

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Array lineal de dobles parches apilados para antena
conformada de comunicaciones WiMax**

**Alejandro Corral Muñoz
Tutor: José Luis Masa Campos
Julio 2018**

Array lineal de dobles parches apilados para antena conformada de comunicaciones WiMax

AUTOR: Alejandro Corral Muñoz

TUTOR: José Luis Masa Campos



**Grupo de Radiofrecuencia, Antenas, Circuitos y Sistemas
Dpto. Tecnologías Electrónicas de Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Julio de 2018**

Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado se ha propuesto diseñar, construir y medir un array lineal con el elemento unitario que conforma una antena octogonal realizada en un proyecto anterior. Se pretende aumentar la ganancia y por tanto la distancia de cobertura de la antena individual, así como asentar la base para una futura red de alimentación que permita modificar el apuntamiento de la antena.

Para realizar este trabajo, primero se ha partido del elemento unitario original y se ha simulado en CST la respuesta de un array compuesto por la misma, con diferentes números de elementos, diferentes separaciones y diferentes tapers en amplitud, buscando el mejor compromiso entre ganancia, capacidad de apuntamiento y menor intrusión del grating lobe.

Una vez elegida la configuración de array, se ha dispuesto a modificar el elemento unitario para acoplar la nueva red de alimentación, corrigiendo las desadaptaciones producidas por el cambio de una alimentación por sonda coaxial, a un híbrido entre sonda coaxial y línea microstrip.

Por último, se ha diseñado la red de alimentación completa, para la cual se ha ido diseñando por tramos, intentando conseguir la mejor adaptación posible. Una vez completado el diseño, se han construido tanto el elemento unitario, como el array completo, para su posterior montaje y medida en la cámara anecoica.

Los resultados obtenidos en la construcción del elemento unitario mejoran en adaptación a las simuladas, mientras que en ganancia se obtienen resultados ligeramente peores debido a las pérdidas introducidas por los cables de la cámara anecoica. Por el contrario, los resultados obtenidos de la medición de la antena no se corresponden con los esperados. Esto puede ser debido a diversos factores.

Abstract (English)

This Bachelor Thesis has been proposed to design, build and measure a linear array with the unitary element that makes up an octagonal antenna made in a previous project. The aim is to increase the gain and thus the coverage distance of the individual antenna, as well as to lay the groundwork for a future feed network that will allow the antenna's pointing to be changed.

At first, from the original unitary element, an array composed by the response of this patch has been simulated in CST, with different numbers of elements, different separations and different tapers in amplitude, looking for the best compromise between gain, pointing capacity and less intrusion of the grating lobe.

Once the array configuration has been chosen, the unitary element is ready to be modified to connect the new feeding network, correcting the mismatches produced by the change from a coaxial probe feeding to a hybrid between a coaxial probe and a microstrip line.

Finally, the complete feed network has been designed, for which it has been designed by sections, trying to achieve the best possible adaptation. Once the design has

been completed, both the unitary element and the complete array have been built for subsequent assembly and measurement in the anechoic chamber.

The results obtained in the construction of the unitary element improve in adaptation to the simulated ones, while in gain, slightly worse results are obtained due to the losses introduced by the wires of the anechoic chamber. On the other hand, the results obtained from the measurement of the antenna array do not correspond to the expected results. This may be due to various factors in construction or design.

Palabras clave (castellano)

Antena, parche, array lineal, array conformado, microstrip, adaptación, red de alimentación, impedancia, parámetros S, acoplamiento, diagrama de radiación.

Keywords (inglés)

Antenna, patch, linear array, conformed array, microstrip, match, feed network, impedance, S parameters, coupling, radiation pattern.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a Jose Luis por elegirme para este TFG, por toda la ayuda que me ha prestado durante todos estos meses, sin la cual no habría sido posible estar hoy escribiendo esta carta, y por la disponibilidad que siempre me ha ofrecido por todos los medios posibles, pese a mis incompatibilidades con su horario.

También quiero agradecer a todos los miembros del grupo RFCAS, y en especial a Pablo, que me ha ayudado a aprender y mejorar en mi manejo con CST, además de resolverme infinidad de problemas y dudas que me han surgido durante estos meses. Por supuesto, también a Víctor y Javi, que se han encargado de construir y medir todas las partes de mi proyecto, sufriendo incluso más que yo intentando hacer lo mejor posible su trabajo, se agradece esa gran implicación desinteresada que tan difícil es de encontrar en las personas.

No me quiero olvidar de todos los compañeros del laboratorio 107, que tantos días hemos pasado juntos ayudándonos unos a otros para conseguir nuestros objetivos, y por qué no, amenizando las largas horas de laboratorio con risas y buen fútbol.

Por último, agradecer a mis amigos y familiares que me han apoyado y animado a seguir adelante y esforzarme cuando me he sentido agobiado o estresado por el proyecto.

Si de alguien me he olvidado y se encuentra leyendo esta carta, que sepa que le debo un agradecimiento en persona acompañado de un café, por supuesto, a mi cuenta.

Alejandro

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte.....	3
2.1	Antenas impresas: parches.....	3
2.2	Formas de alimentación.....	4
2.3	Arrays de antenas.....	5
2.3.1	Arrays lineales.....	6
2.3.2	Arrays reticulares planos.....	7
2.3.3	Arrays conformados.....	8
2.4	Acoplamiento entre antenas.....	9
2.4.1	Parámetros de dispersión.....	9
2.4.2	Parámetros S activos.....	10
3	Diseño del array lineal.....	11
3.1	Elección del número de elementos y separación.....	11
4	Modificación del elemento unitario.....	15
4.1	Elemento unitario original.....	15
4.2	Modificación del elemento unitario.....	16
4.3	Construcción y medida.....	17
5	Diseño de la red de alimentación.....	23
5.1	Diseño del primer paralelo.....	23
5.1.1	Primer elemento.....	23
5.1.2	Segundo elemento.....	25
5.1.3	Primer paralelo.....	26
5.2	Línea adaptadora del parche central.....	28
5.3	Ajuste de fase.....	31
5.4	Entrada.....	33
5.5	Construcción y medida del array.....	35
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	41
6.1	Conclusiones.....	41
6.2	Trabajo futuro.....	41
	Referencias.....	43
	Glosario.....	45
	Anexos.....	XLVII
A	Elementos contruidos.....	XLVII
A.1	Piezas del doble parche apilado construido.....	XLVII
A.2	Piezas de la red de alimentación y el array contruidos.....	- 1 -

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ANTENA CONFORMADA OCTOGONAL DE DOBLES PARCHES APILADOS	1
FIGURA 2.1 PARCHE RECTANGULAR	3
FIGURA 2.2 PARCHE CIRCULAR	3
FIGURA 2.3 DOBLE PARCHE APILADO	4
FIGURA 2.4 ALIMENTACIÓN POR SONDA COAXIAL	4
FIGURA 2.5 ALIMENTACIÓN POR LÍNEA MICROSTRIP	5
FIGURA 2.6 ESQUEMA ARRAY LINEAL	6
FIGURA 2.7 ESQUEMA ARRAY PLANAR.....	7
FIGURA 2.8 ARRAY CONFORMADO CIRCULAR.....	8
FIGURA 2.9 ONDAS ENTRANTES Y REFLEJADAS EN UNA RED DE N PUERTAS	9
FIGURA 2.10 ESQUEMA DE ONDAS INCIDENTES Y REFLEJADAS EN UN ARRAY DE ANTENAS	10
FIGURA 3.1 SIMULADOR DE ARRAY CST	11
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN ARRAY DE 5 PARCHES.....	12
FIGURA 3.3 ARRAY DE 5 PARCHES ELEMENTO UNITARIO ORIGINAL	12
FIGURA 3.4 PARÁMETROS S ARRAY DE 5 PARCHES	12
FIGURA 3.5 PARÁMETRO S Y ACOPLLOS DEL ELEMENTO 2.....	13
FIGURA 3.6 PARÁMETROS S ACTIVOS DEL ARRAY BROADSIDE CON TAPER DE -2dB.....	14
FIGURA 3.7 PARÁMETROS S ACTIVOS DEL ARRAY CON APUNTAMIENTO DE 25° Y TAPER DE -2DB..	14
FIGURA 4.1 ELEMENTO UNITARIO ORIGINAL.....	15
FIGURA 4.2 ADAPTACIÓN DEL DOBLE PARCHE ORIGINAL.....	15
FIGURA 4.3 DISEÑO DEL PARCHE Y ALIMENTACIÓN MODIFICADOS	16
FIGURA 4.4 ADAPTACIÓN DEL NUEVO DOBLE PARCHE	17
FIGURA 4.5 CAJEADO DEL PARCHE	17

FIGURA 4.6 GERBERS DEL ELEMENTO UNITARIO.....	18
FIGURA 4.7 ELEMENTO UNITARIO CONSTRUIDO.....	18
FIGURA 4.8 MEDIDAS DEL ELEMENTO UNITARIO CONSTRUIDO VS ELEMENTO UNITARIO SIN COAXIAL.....	19
FIGURA 4.9 MEDIDAS DEL ELEMENTO UNITARIO CONSTRUIDO VS ELEMENTO UNITARIO CON COAXIAL.....	19
FIGURA 4.10 ELEMENTO UNITARIO EN LA CÁMARA ANECOICA	19
FIGURA 4.11 GANANCIA DEL ELEMENTO UNITARIO CONSTRUIDO	20
FIGURA 4.12 DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO DEL ELEMENTO UNITARIO $F = 3.2\text{GHz}$	20
FIGURA 4.13 DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO DEL ELEMENTO UNITARIO $F = 3.5\text{GHz}$	21
FIGURA 4.14 DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO DEL ELEMENTO UNITARIO $F = 3.8\text{GHz}$	21
FIGURA 5.1 ESQUEMA RED DE ALIMENTACIÓN	23
FIGURA 5.2 LÍNEA DE SALIDA DEL PRIMER ELEMENTO.....	24
FIGURA 5.3 ADAPTACIÓN RED DE SALIDA DEL PRIMER ELEMENTO.....	24
FIGURA 5.4 LÍNEA DE SALIDA DEL SEGUNDO ELEMENTO.....	25
FIGURA 5.5 ADAPTACIÓN RED DE SALIDA DEL SEGUNDO ELEMENTO.....	25
FIGURA 5.6 DISEÑO EN ADS DEL PRIMER PARALELO.	26
FIGURA 5.7 SIMULACIÓN EN CST PARA SIMULAR ACOPLAMIENTOS EN ADS.....	26
FIGURA 5.8 DISEÑO EN ADS DEL PRIMER PARALELO CON S2P.....	27
FIGURA 5.9 ADAPTACIÓN DEL PRIMER PARALELO EN ADS.	27
FIGURA 5.10 PRIMER PARALELO.....	28
FIGURA 5.11 ADAPTACIÓN DEL PRIMER PARALELO.....	28
FIGURA 5.12 LÍNEA CENTRAL.	29
FIGURA 5.13 DISEÑO EN ADS DE LA LÍNEA CENTRAL	29
FIGURA 5.14 ADAPTACIÓN EN ADS DE LA LÍNEA CENTRAL.	30
FIGURA 5.15 ADAPTACIÓN DE LA LÍNEA CENTRAL.....	30
FIGURA 5.16 CÁLCULO DE FASES DEL PRIMER PARALELO	31

FIGURA 5.17 DESFASE ENTRE EL ELEMENTO 1 Y EL ELEMENTO 2	31
FIGURA 5.18 CÁLCULO DE LA FASE DE LA LÍNEA CENTRAL	32
FIGURA 5.19 FASE DE LA LÍNEA CENTRAL.....	32
FIGURA 5.20 COMPARACIÓN DE FASES	32
FIGURA 5.21 SIMULACIÓN EN CST PARA SIMULAR ACOPLAMIENTO EN ADS II.....	33
FIGURA 5.22 DISEÑO EN ADS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN COMPLETA	33
FIGURA 5.23 ADAPTACIÓN EN ADS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN COMPLETA	34
FIGURA 5.24 RED DE ALIMENTACIÓN COMPLETA.....	34
FIGURA 5.25 ADAPTACIÓN RED DE ALIMENTACIÓN COMPLETA.....	35
FIGURA 5.26 DISEÑO ARRAY Y RED DE ALIMENTACIÓN PARA CONSTRUIR	35
FIGURA 5.27 GERBERS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN Y EL ARRAY	36
FIGURA 5.28 ANTENA COMPLETA.....	36
FIGURA 5.29 ADAPTACIÓN DE LA ANTENA CONSTRUIDA(ROJO) VS ANTENA EN CST(AZUL)	37
FIGURA 5.30 MEDICIÓN DE LA ANTENA EN LA CÁMARA ANECOICA.....	37
FIGURA 5.31 GANANCIA DE LA ANTENA CONSTRUIDA	38
FIGURA 5.32 CAMPO RADIADO POR LA ANTENA $F = 3.2\text{GHz}$	38
FIGURA 5.33 CAMPO RADIADO POR LA ANTENA $F = 3.5\text{GHz}$	39
FIGURA 5.34 CAMPO RADIADO POR LA ANTENA $F = 3.8\text{GHz}$	39
FIGURA A.0.1 PARCHE INDIVIDUAL CONSTRUIDO	XLVII
FIGURA A.0.2 PARCHE APILADO CONSTRUIDO	XLVII
FIGURA A.0.3 RED DEL PARCHE INDIVIDUAL CONSTRUIDA	XLVII
FIGURA A.0.4 ARRAY DE PARCHES CONSTRUIDO	- 1 -
FIGURA 0.5 RED DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDA	- 1 -

1 Introducción

Este proyecto está desarrollado partiendo de una antena conformada octogonal, qué por medio de una red de alimentación con elementos conmutados controlada por un Arduino, es capaz de sectorizar la radiación del plano H.

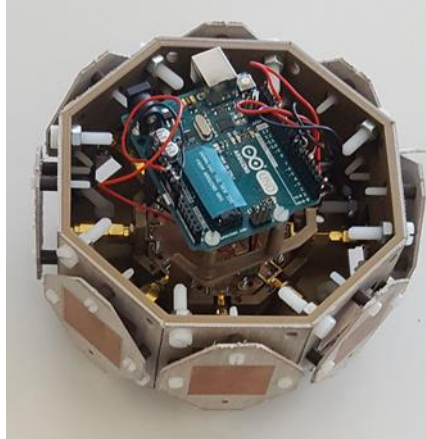


Figura 1.1 Antena conformada octogonal de dobles parches apilados

La antena esta diseñada para radiar a la frecuencia de 3.5GHz. Dicha banda estaba dedicada para comunicaciones WiMAX, pero en el Boletín Oficial del Estado del 20/04/2018, en el que se exponen los cambios en el cuadro nacional de atribución de frecuencias, la banda de 3,4 a 3,8 GHz queda reservada para comunicaciones 5G, por lo que la antena cambiaría su uso a comunicaciones 5G.

1.1 Motivación

No siempre la función de una antena requiere entregar cobertura en el mismo plano de la antena, ni a la misma distancia, en muchas ocasiones se necesita tener una mayor ganancia que permita aumentar la distancia de cobertura, así como modificar el apuntamiento de la antena para reducir interferencias o cambiar la situación de la antena sin perder cobertura.

Este TFG pretende aumentar la cobertura máxima de una estación base de dobles parches pensada para dar cobertura a entornos cerrados, y asentar las bases para poder crear una red desfasadora, que permita modificar el apuntamiento, para así mejorar las características de dicha estación base, dotándola de una mayor versatilidad a la hora de posicionarla, además de aumentar el radio de cobertura máximo que puede cubrir.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es diseñar, construir y medir un array lineal de parches en tecnología microstrip con una red de alimentación situada en la cara opuesta de los parches, que facilite la futura construcción de una antena conformada octogonal con dicho array como elemento unitario.

El objetivo del array respecto al elemento unitario es estrechar el haz del plano E de la antena, aumentando la ganancia máxima de la misma y por consiguiente aumentar el

rango de cobertura en distancia. Además, se van a tener en cuenta en el diseño del array la capacidad para modificar el apuntamiento de la antena.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Motivación, objetivos y organización de la memoria.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Fundamentos teóricos sobre antenas de parche, tipos de alimentación, agrupaciones de antes y acoplos.
- **Capítulo 3: Diseño del array lineal.** Elección del número de elementos del array, separación y tipo de alimentación.
- **Capítulo 4: Modificación del elemento unitario.** Presentación de diseño y adaptación del elemento radiante original. Modificación y adaptación del parche al nuevo tipo de alimentación.
- **Capítulo 5: Diseño de la red de alimentación.** Diseño de la red de alimentación por tramos y ajuste de fase para una alimentación tipo Broadside.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.**
- **Referencias.**

2 Estado del arte

2.1 Antenas impresas: parches.

Las antenas impresas son antenas planas fabricadas en tecnología de circuito impreso. La funcionalidad de estas antenas se fundamenta en la potencia disipada por una línea microstrip, la cual se incrementa con el aumento del ancho de la línea. Esto permite diseñar un elemento radiante. Los espesores que se utilizan para su fabricación están entre los $0,005\lambda_0$ y los $0,2\lambda_0$. Los parches pueden tener multitud de formas, pero las más utilizadas son la cuadrada, rectangular, circular y con forma de dipolo.

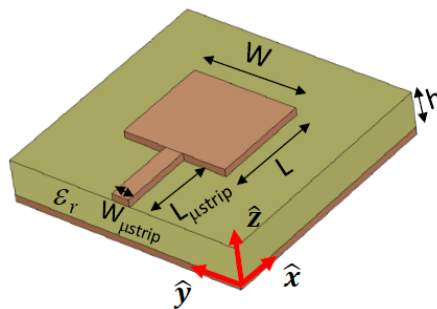


Figura 2.1 Parche rectangular

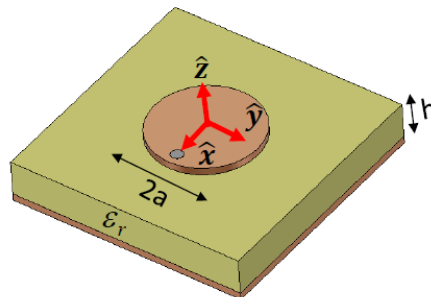


Figura 2.2 Parche circular

Estas antenas tienen las ventajas de tener una fácil integración con la red de alimentación, además de un bajo coste. Por el contrario, son antenas de banda estrecha y limitadas en potencia. Se utilizan, entre otras cosas, en telefonía móvil, comunicaciones por satélite y radares.

Para aumentar el ancho de banda en antenas resonantes se aumenta su volumen. En antenas de parche en tecnología microstrip se puede aumentar la altura del sustrato h , pero para determinados tipos de alimentación esto supone un problema. Por ello, una segunda opción es la inclusión de un segundo parche resonante elevado en altura con respecto al parche original y separados por aire. Esto genera dos resonancias muy próximas en frecuencia, que dan como resultado un ancho de banda mayor.

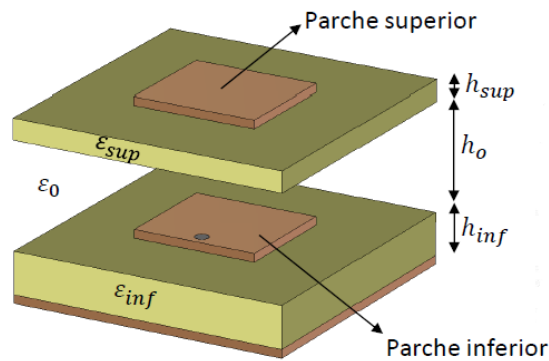


Figura 2.3 Doble parche apilado

2.2 Formas de alimentación.

Existen diferentes formas de alimentar las antenas de parche. La utilizada en este proyecto es un híbrido entre las dos siguientes:

- **Alimentación por sonda coaxial:** La implementación se realiza soldando el alma del coaxial al parche, mientras que el conductor exterior se suelda al plano de masa. Disminuye el ancho de banda y es más complicado de adaptar cuanto mayor es el espesor del dieléctrico.

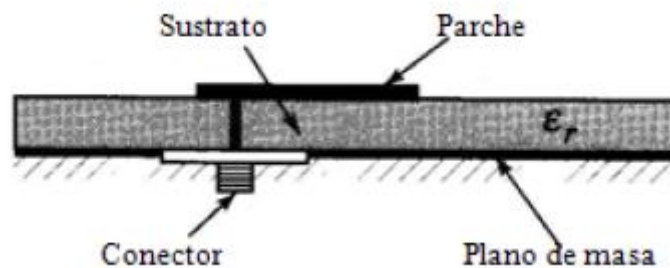


Figura 2.4 Alimentación por sonda coaxial

- **Alimentación con línea microstrip:** La implementación se realiza diseñando una línea microstrip, la cual tiene un ancho mucho menor al parche, a partir de un lado del parche. En ocasiones la línea de alimentación se adentra en el parche con el objetivo de modificar la impedancia vista equivalente de la antena. Disminuye el ancho de banda entre un 2% y un 5% debido a la radiación espúrea producida por la línea microstrip.

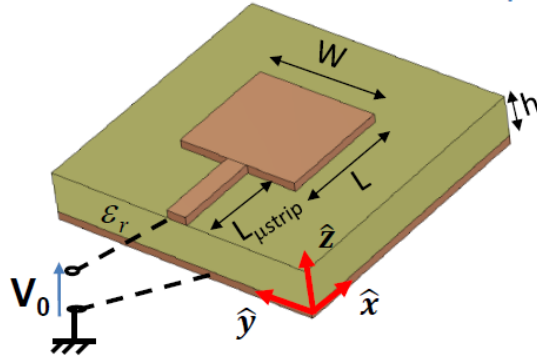


Figura 2.5 Alimentación por línea microstrip

2.3 Arrays de antenas.

En ocasiones, se necesitan mejores prestaciones que las obtenidas con la implementación de una antena con un solo elemento. Estos requerimientos de ganancia o directividad en ocasiones pueden ser satisfechos con un aumento en las dimensiones de la antena, pero en la mayoría de las ocasiones esto no es posible, por este motivo se utilizan los arrays. Un array es un conjunto de antenas, generalmente iguales entre sí, alimentadas desde un terminal común mediante redes lineales. Las principales ventajas que aporta un array frente al elemento unitario, es una mayor ganancia y la capacidad de direccionar el apuntamiento del diagrama de radiación y minimizar direcciones interferentes.

Los arrays o agrupaciones de antenas, se clasifican según su estructura geométrica o según su red de alimentación.

El campo radiado por un elemento “n” en su posición \vec{r}_n es igual al campo radiado por el elemento “n” en el centro de coordenadas $\vec{E}_{n,0}(r, \theta, \phi)$, ponderado por el cambio de fase debido a la posición \vec{r}_n y con la alimentación de corriente I_n correspondiente.

$$\vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \vec{E}_{n,0}(r, \theta, \phi) \cdot \frac{I_n}{I_0} \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n}$$

El campo radiado por el array corresponde con el sumatorio de los campos radiados por cada elemento que compone el array:

$$\vec{E}_A(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \phi)$$

Y si el array es formado por el mismo elemento, el campo radiado es igual al del elemento unitario por el factor de array:

$$\vec{E}_0(r, \theta, \phi) \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n}$$

2.3.1 Arrays lineales.

En los arrays lineales los elementos se distribuyen a lo largo de una línea recta.

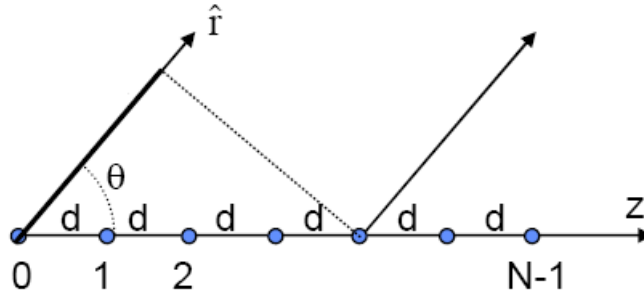


Figura 2.6 Esquema array lineal

Existen dos tipos de arrays lineales, los equiespaciados y los no equiespaciados.

El factor de array de un array lineal equiespaciado en el que todos los elementos son iguales es:

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d \cdot \cos\theta + \alpha_n)}$$

Donde

$$A_n = a_n \cdot e^{j\alpha_n}$$

Las leyes de alimentación más utilizadas son:

- Fase progresiva.
- Uniforme en amplitud y en fase.
- Uniforme en amplitud y fase progresiva.
- Tipo taper: amplitud simétrica y decreciente del centro al borde.

Con la variación de la fase progresiva se consigue que el lóbulo principal del campo radiado del array varíe su dirección de apuntamiento en el espacio. A este tipo de array se le llama array de exploración.

El ángulo de apuntamiento para un array lineal según el eje z viene dado por.

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(-\frac{\alpha}{k_0 \cdot d} \right)$$

Donde α representa el desfase progresivo y d la separación entre elementos.

Si no existe desfase entre elementos, para un array dispuesto en el eje z, la dirección de apuntamiento será de $\theta=90^\circ$. Los arrays con este método de alimentación se les llama arrays Broadside.

Un último tipo de array lineal según el método de alimentación utilizado es el array Endfire. Este array se caracteriza por tener su lóbulo principal apunto al eje del propio array.

2.3.2 Arrays reticulares planos.

En un array planar los elementos se disponen en un plano, formando una retícula de tamaño $M \times N$.

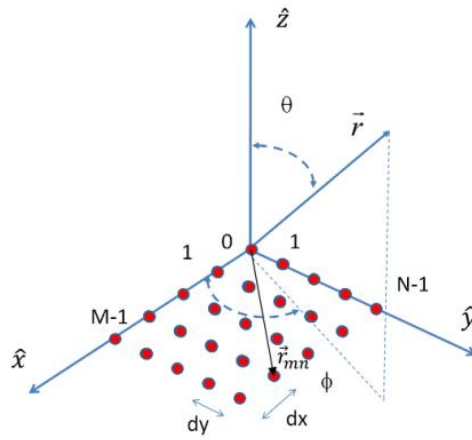


Figura 2.7 Esquema Array planar

Con esta disposición se consiguen haces tipo pincel orientados en cualquier dirección. La forma de obtener el factor de array es igual que en arrays lineales, utilizando el vector de posición de cada elemento de la agrupación reticular para calcular el desfase por desplazamiento de los elementos del array con respecto del eje de coordenadas.

$$\begin{aligned}
 F_A(\theta, \phi) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cdot e^{j k_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_{mn}} \\
 &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot e^{j(m \cdot k_0 \cdot d_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi)} \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d_y \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi)}
 \end{aligned}$$

2.3.3 Arrays conformados.

En un array conformado, los elementos radiantes se disponen sobre una superficie en tres dimensiones, como por ejemplo un prisma, un cilindro o incluso sobre el fuselaje de un avión.

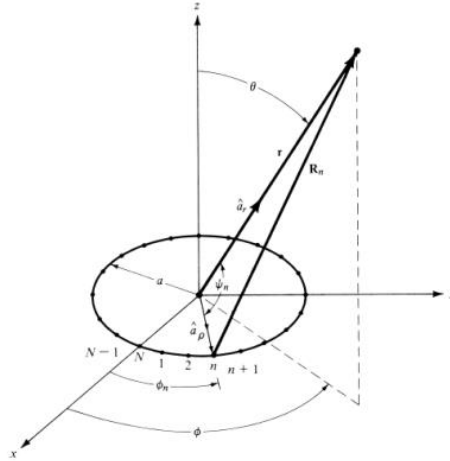


Figura 2.8 Array conformado circular

En el caso de los arrays conformados, el factor de array no se puede separar del campo E_0 , ya que al estar sobre una superficie tridimensional, la dirección de máximo apuntamiento de cada elemento no es igual, por lo que hay que caracterizarlo en función de la posición de cada uno. La fórmula del campo radiado es la siguiente:

$$\vec{E}_A(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_{0,n}(r, \theta, \phi) \cdot A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n}$$

2.4 Acoplamiento entre antenas

2.4.1 Parámetros de dispersión.

Los parámetros de dispersión o parámetros S, describen el comportamiento de cualquier dispositivo de microondas. Para cada terminal del dispositivo se definen dos ondas, la onda incidente (a_i) entrante a la red y la onda reflejada (b_i) saliente.

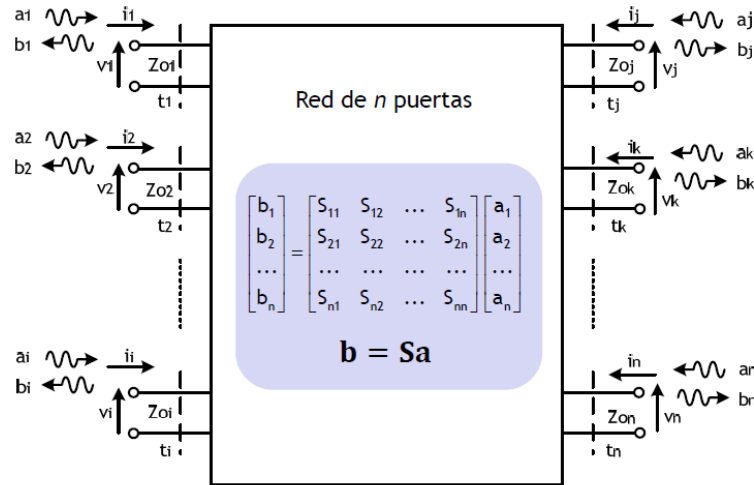


Figura 2.9 Ondas entrantes y reflejadas en una red de n puertos

La matriz de parámetros S relaciona las ondas entrantes con las ondas reflejadas de la red. En el interior de la red de la figura 2.8 se puede observar la matriz de parámetros S para una red de n puertos.

Para calcular cada parámetro S hay que cargar todos los terminales de la red con la impedancia característica del mismo salvo el terminal en el cual se quiere calcular, el cual habrá que conectar un generador que produzca la onda incidente. Con esto se consigue que todas las demás ondas incidentes sean cero. Existen dos tipos de coeficientes, los llamados coeficientes de adaptación, definidos por:

$$S_{ii} = \left. \frac{b_i}{a_i} \right|_{\substack{a_k=0 \\ k \neq i}}$$

Y los coeficientes de transmisión:

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{\substack{a_k=0 \\ k \neq i}}$$

2.4.2 Parámetros S activos.

Se puede establecer una matriz S de acoplos entre antenas referidos en sus entradas, que establece adaptaciones pasivas de cada elemento radiante de la agrupación y parámetros de transmisión de señales acopladas entre las antenas de dicha agrupación como se ha expuesto en el apartado anterior, pero cuando se trata de agrupaciones de antenas, generalmente no se tienen cargas con la impedancia característica en cada puerta de la red, es por ello que la influencia que ejercen los coeficientes de transmisión del resto de elementos de una red sobre el coeficiente de adaptación de un elemento concreto no es nula.

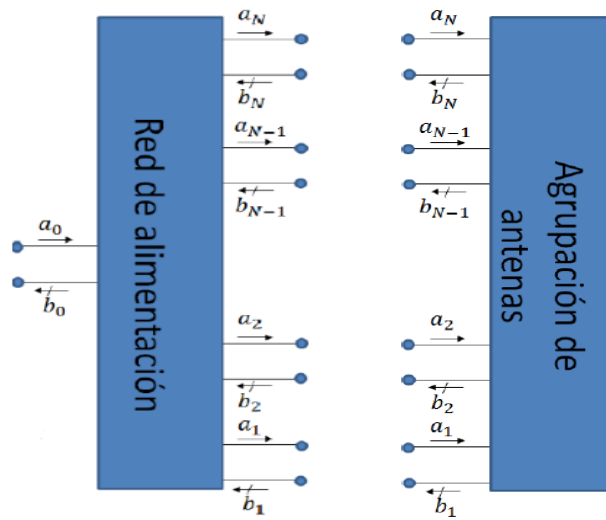


Figura 2.10 Esquema de ondas incidentes y reflejadas en un array de antenas

El coeficiente de adaptación activo Γ_i , depende de los coeficientes de alimentación a_n proporcionados por la red de alimentación a todos los elementos del array, de la adaptación pasiva del elemento i con presencia del resto sin alimentar y de los coeficientes de acoplamiento mutuo entre elementos de la agrupación. El resultado es el siguiente:

$$\Gamma_{act,i} = \frac{b_i}{a_i} = \sum_{n=1}^N s_{in}^a \frac{a_n}{a_i} = s_{ii}^a + \sum_{\substack{n=1 \\ i \neq n}}^N s_{in}^a \frac{a_n}{a_i}$$

3 Diseño del array lineal

El objetivo del array lineal es buscar el mejor compromiso entre adaptación e intrusión del grating lobe, maximizando la ganancia máxima y la capacidad de desapuntamiento máximo. El array se implementa en el eje Y, debido a la disposición del elemento unitario en la antena conformada octogonal.

3.1 Elección del número de elementos y separación.

En un primer acercamiento se parte de la simulación en campo lejano del elemento unitario, y se realizan diferentes pruebas con la herramienta de CST para representar la respuesta de un array formado por dicho elemento.

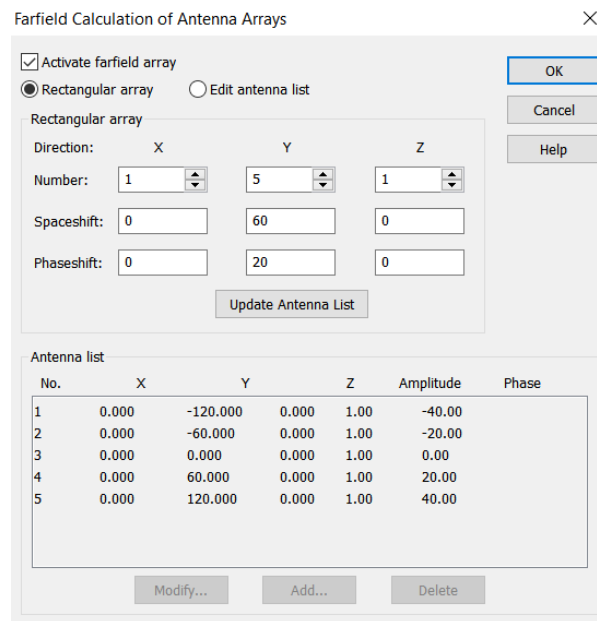


Figura 3.1 Simulador de array CST

En estas pruebas se han hecho simulaciones para arrays de 4, 5 y 6 elementos en las que se han realizado desfases progresivos hasta que la aparición del grating lobe es demasiado alta. Además, con objetivo de mejorar la relación entre la ganancia y el grating lobe, se añadieron nuevas simulaciones en las que, junto a los desfases, se ha realizado un taper en amplitud de -2dB y -3dB.

A medida que el desfase progresivo aumenta y se desapunta el lóbulo principal, la ganancia máxima del array disminuye levemente, pero la aparición del grating lobe se va incrementando considerablemente.

Con los resultados obtenidos, se escoge una configuración de 5 parches, debido a que el aumento que se produce en ganancia con una configuración de 6 elementos es de 1dB, pero la aparición del grating lobe es más acentuada y la futura construcción más difícil de afrontar por el tamaño total del array.

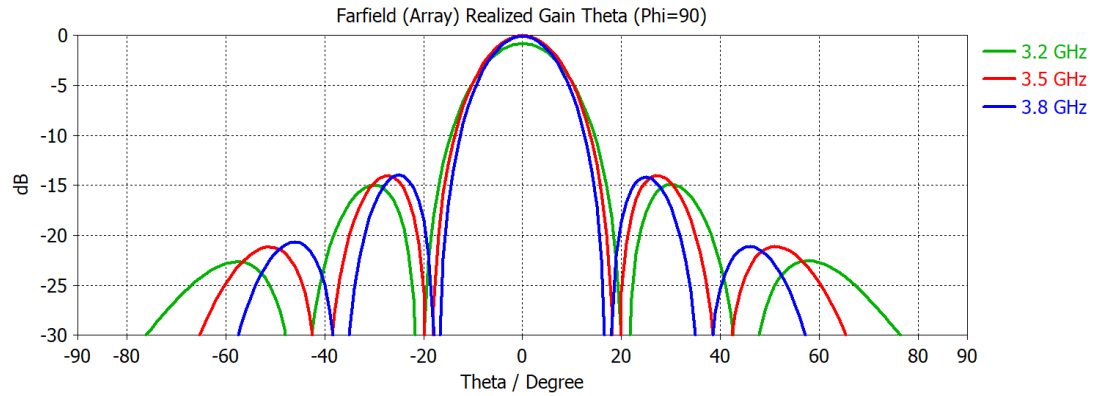


Figura 3.2 Diagrama de radiación array de 5 parches.

Una vez elegido el número de elementos, se procede a la elección de la separación entre los mismos. Para ello, se opta por realizar el estudio con separaciones comprendidas entre 50mm y 55mm, ya que se disminuye la aparición del grating lobe. Para seleccionar la mejor separación se diseña el array completo en CST con un puerto en cada coaxial de entrada. La simulación de todos los puertos calcula los parámetros S que reflejan la adaptación de cada parche teniendo en cuenta la presencia de los demás y permite ver los acoplamientos producidos por la radiación del resto de elementos.

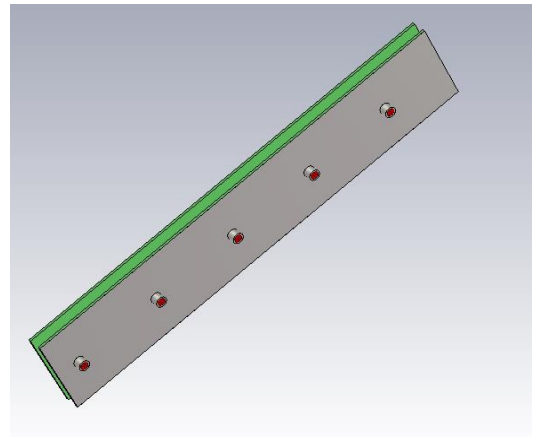
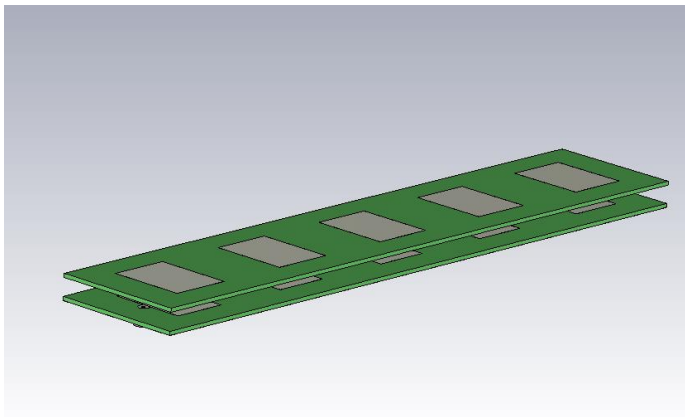


Figura 3.3 Array de 5 parches elemento unitario original

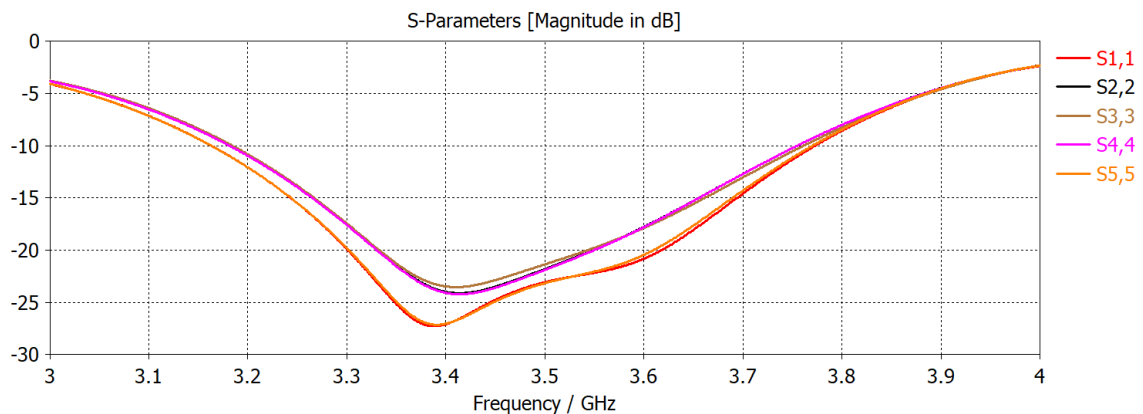


Figura 3.4 Parámetros S array de 5 parches

En los parámetros S calculados por CST, se puede observar elevados acoplamientos, especialmente entre los parches consecutivos. Esto es debido a la poca separación y a la dirección del array en Y , que coincide con la dirección de radiación.

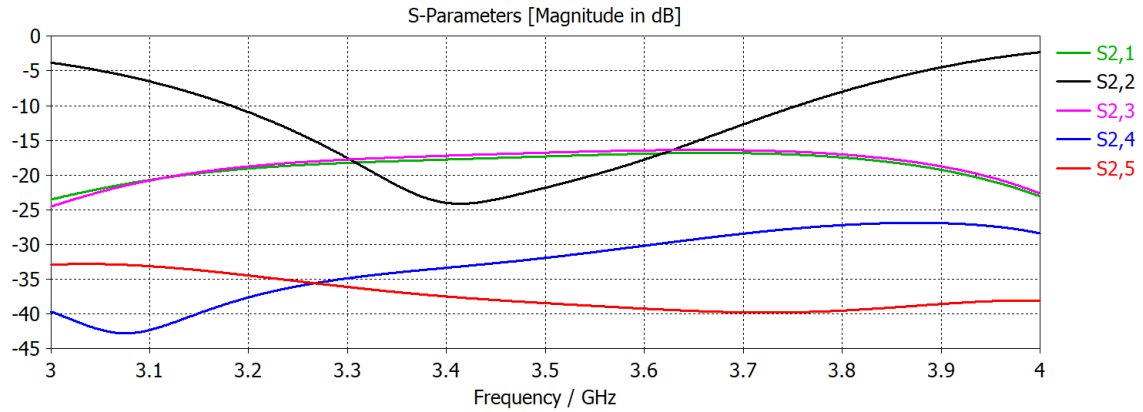


Figura 3.5 Parámetro S y acoplos del elemento 2.

En la figura 3.5 se puede observar el parámetro S correspondiente al segundo elemento del array, y los acoplamientos que generan los demás elementos sobre dicho parche. Se puede observar como los acoplamientos provenientes de los parches consecutivos son bastante elevados con respecto a los provenientes de los parches más lejanos.

Para representar el impacto en la adaptación producido por los acoplamientos de los parches, se procede a calcular la adaptación activa. Para la realización del cálculo de los parámetros S activos, se exporta la amplitud y la fase de cada parámetro S , y mediante un script elaborado en Matlab, se realiza un cálculo de los parámetros para diferentes apuntamientos y tapers en amplitud.

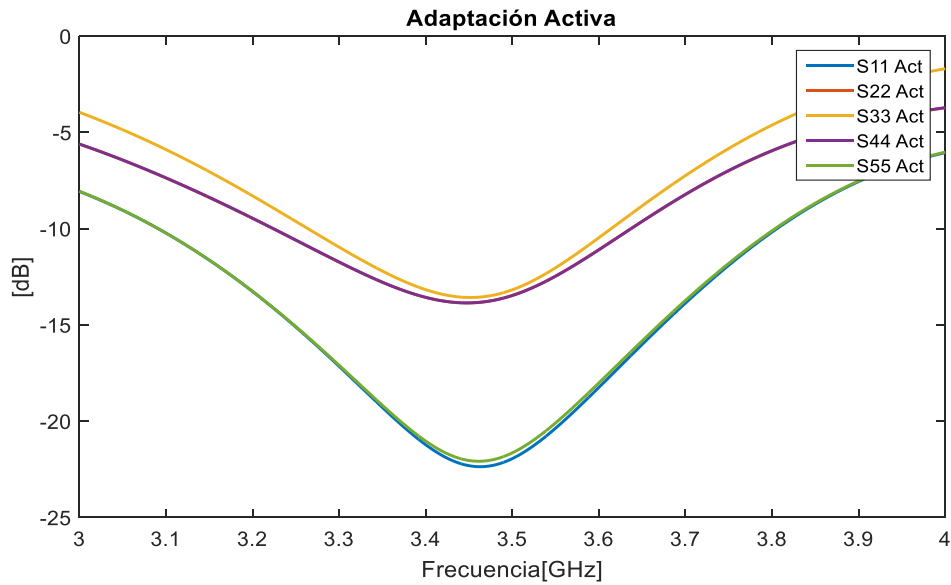


Figura 3.6 Parámetros S activos del array Broadside con taper de -2dB

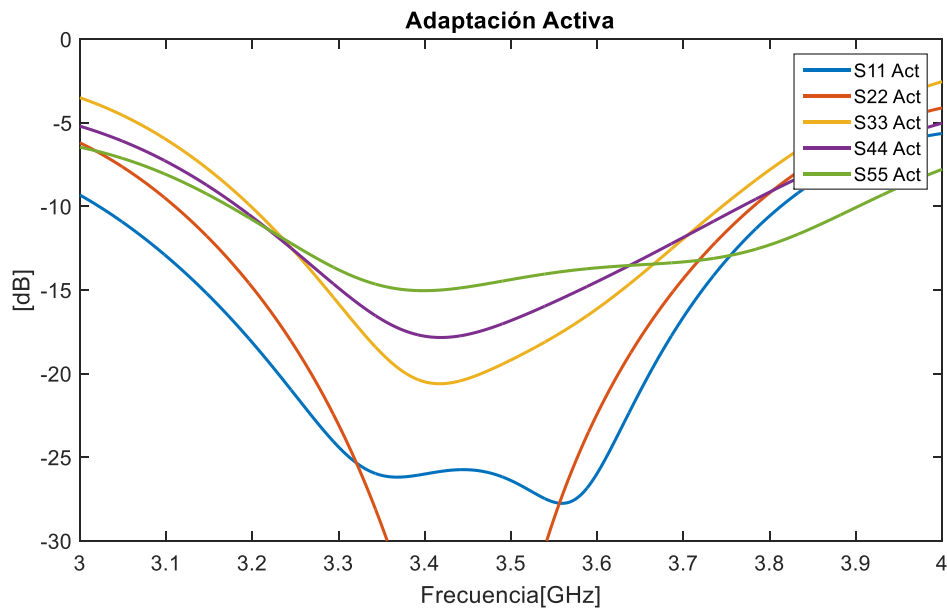


Figura 3.7 Parámetros S activos del array con apuntamiento de 25° y taper de -2dB

Se puede observar como mejora la adaptación de los parches con la modificación del apuntamiento de la antena. Esto se debe a que la fase introducida para modificar el apuntamiento produce que se contrarreste en parte la influencia de la radiación de los demás parches.

Finalmente se opta por un diseño de 5 parches con separación de 53 mm entre elementos y taper de -2dB.

4 Modificación del elemento unitario

4.1 Elemento unitario original.

El elemento unitario que compone la antena conformada octogonal consta de un doble parche apilado con 7 mm de separación en altura, contruidos sobre un substrato RF35 de 1,524 mm de espesor y $\epsilon_r=3,5$.

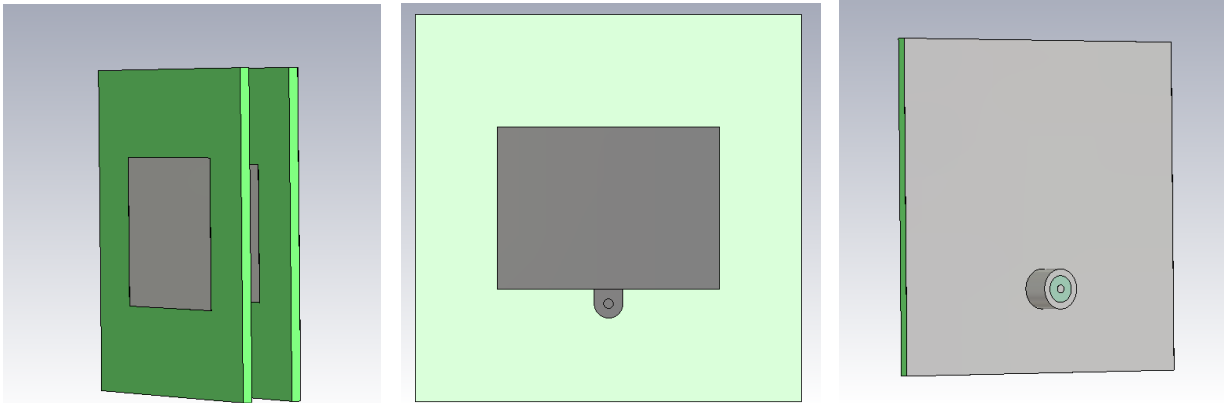


Figura 4.1 Elemento unitario original

Las dimensiones de los parches son:

Parche apilado $\rightarrow W = 30,28 \text{ mm}$ $L = 24,2 \text{ mm}$

Parche principal $\rightarrow W = 30,28 \text{ mm}$ $L = 22 \text{ mm}$

La alimentación del parche se realiza a través de una sonda coaxial, cuyo conector está situado en la cara posterior al parche, que corresponde con el plano de masa.

Para poder alimentar la antena, el parche tiene una porción de metal en forma de oreja a la que va soldada el alma del coaxial. La forma de esta pieza metálica adapta el parche a los 50Ω del coaxial. Además, se realiza una apertura circular en la capa metálica de masa para evitar que se produzca un cortocircuito.

La adaptación del doble parche apilado original es la siguiente:

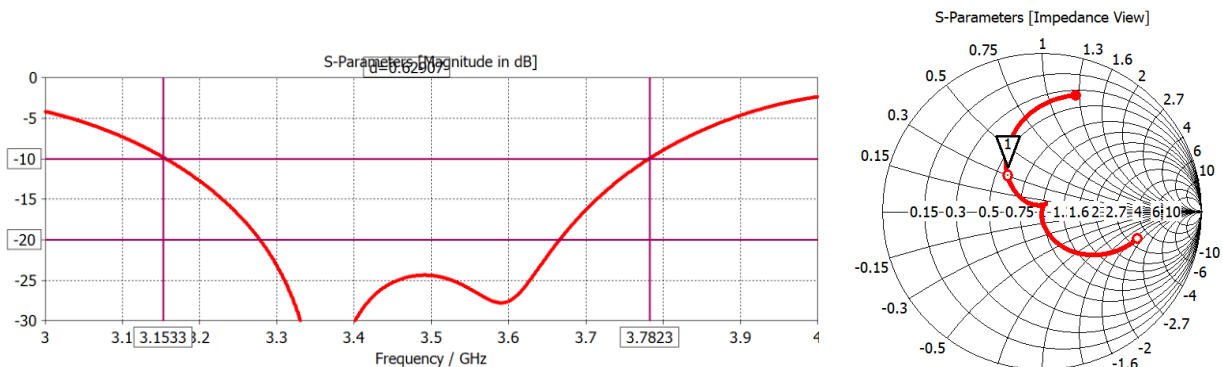


Figura 4.2 Adaptación del doble parche original

Como se puede observar en la figura 4.2, el parche apilado original tiene un ancho de banda de 0.62 GHz en la banda de -10 dB y 0.39 GHz a -20 dB.

4.2 Modificación del elemento unitario.

La construcción del array de este proyecto conlleva la construcción de su propia red de alimentación. De acuerdo con el objetivo futuro del array, el cual es construir una antena conformada octogonal, la red de alimentación se construye en la parte posterior del parche en tecnología microstrip, uniendo los planos de masa de los dos sustratos y conectando la red y el parche por medio de un remache para electrónica. Se trata de un tipo de alimentación híbrida entre alimentación por línea microstrip y alimentación por sonda coaxial. Con motivo de maximizar el espacio dentro de la futura antena conformada octogonal para la red de alimentación principal, se escoge un sustrato RF35 de espesor 0,5mm.

Al realizar el cambio del conector de la sonda coaxial de 50Ω por el sustrato con la red de alimentación y el remache, se produce una desadaptación que requiere modificar la pieza metálica que adaptaba la impedancia del parche a los 50Ω de la sonda coaxial, así como ajustar el borde metálico que rodea el remache en la salida de la red y diseñar una línea adaptadora que ajuste la impedancia y corrija la parte imaginaria. Se realiza el siguiente diseño:

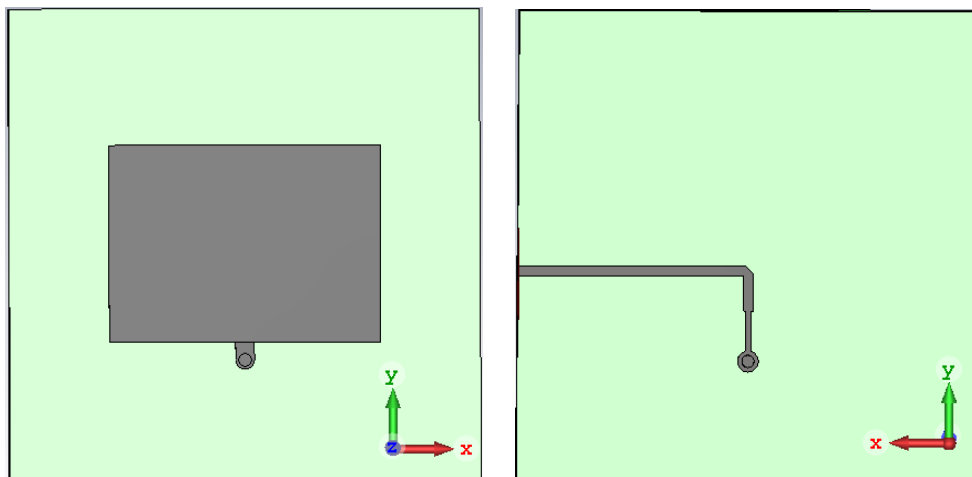


Figura 4.3 Diseño del Parche y alimentación modificados

Se puede observar la reducción del tamaño en la oreja del parche para reducir las capacitancias producidas en la discontinuidad. También se observa la línea adaptadora a continuación del remache que adapta el conjunto del parche y el remache a 50Ω . En este diseño se ha implementado un codo ya que es la dirección que se va a utilizar para continuar con el resto de la red. La adaptación que se obtiene es la siguiente:

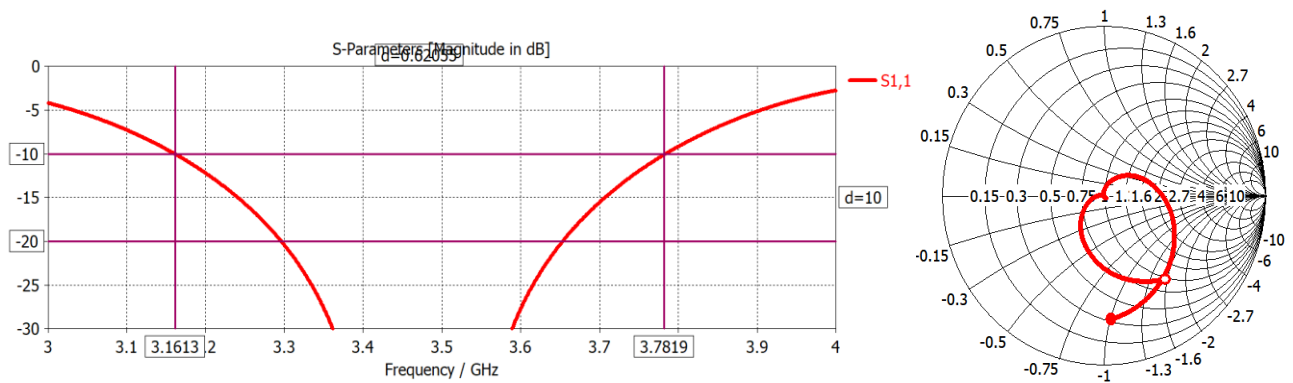


Figura 4.4 Adaptación del nuevo doble parche

Se observa cómo se consigue mantener el ancho de banda a -10 dB, mientras que se pierde ligeramente ancho de banda a -20 dB, producto de la mayor acentuación de la segunda resonancia producida por el doble parche.

4.3 Construcción y medida.

Para la construcción del doble parche apilado se realiza un primer paso que consiste en el diseño de un cajeadado en el sustrato perteneciente al parche para poder soldar los pines de tierra del conector de la sonda coaxial al plano de masa.

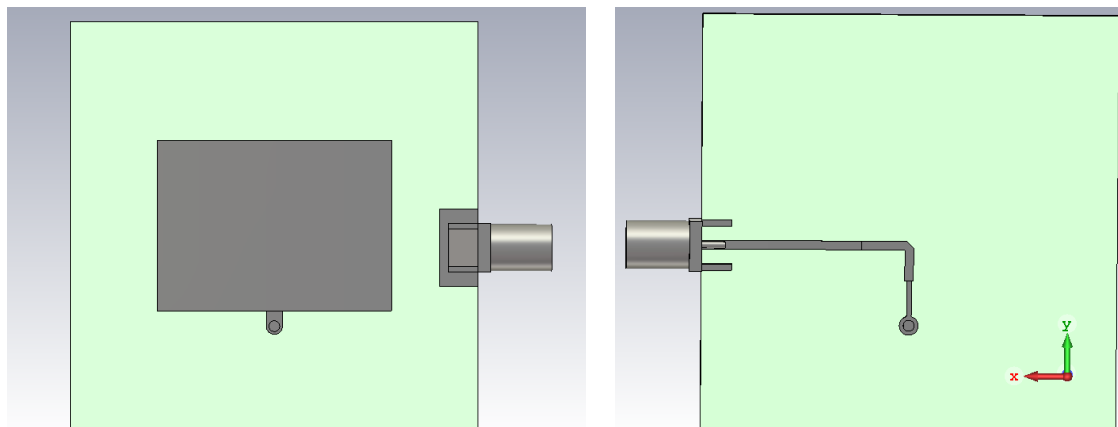


Figura 4.5 Cajeadado del parche

El siguiente paso es el de diseñar todos los taladros que se deben realizar para la sujeción del parche apilado, la cámara anecoica y para el remache. Estas sujeciones servirán también para unir por presión los planos de masa del parche y la red. Se construyen dos parches principales, uno con plano de masa y otro sin el plano de masa, aunque finalmente solo se monta el parche con plano de masa.

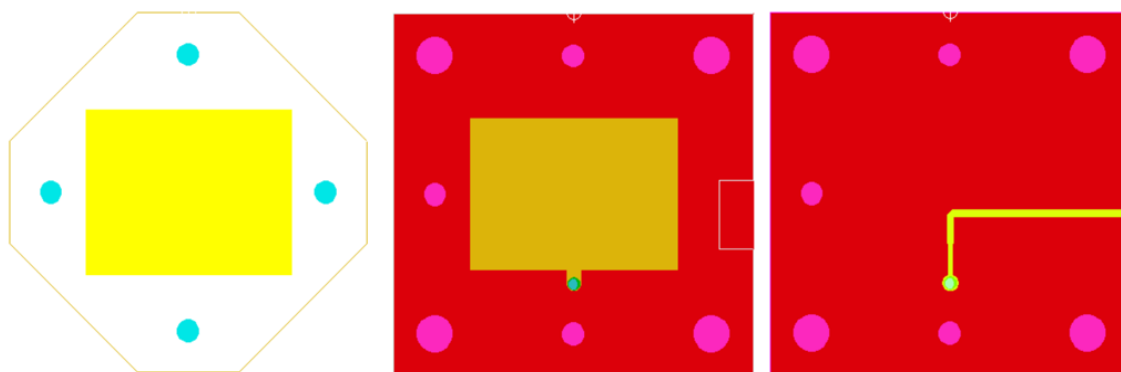


Figura 4.6 Gerbers del elemento unitario

Una vez construidas las tres partes, se unen por medio de tornillos con separadores de 7mm y se unen la red y el parche principal con el remache seleccionado de 1,4mm. Por último, se suelda tanto el remache como el conector. El resultado es el siguiente:

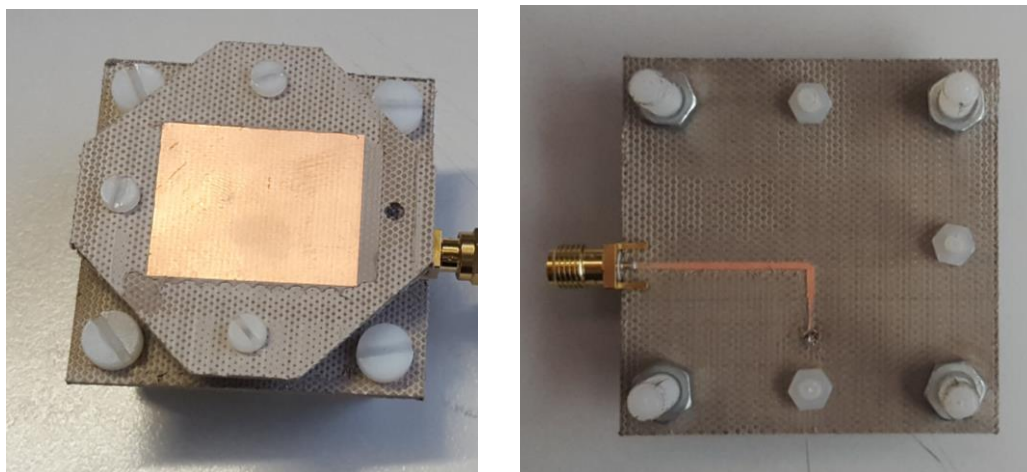


Figura 4.7 Elemento unitario construido

Se mide la adaptación en el analizador de espectros y se compara con la adaptación obtenida en CST. Se ha realizado una comparación con el elemento unitario que incluye el conector de la sonda coaxial y otra sin la conexión.

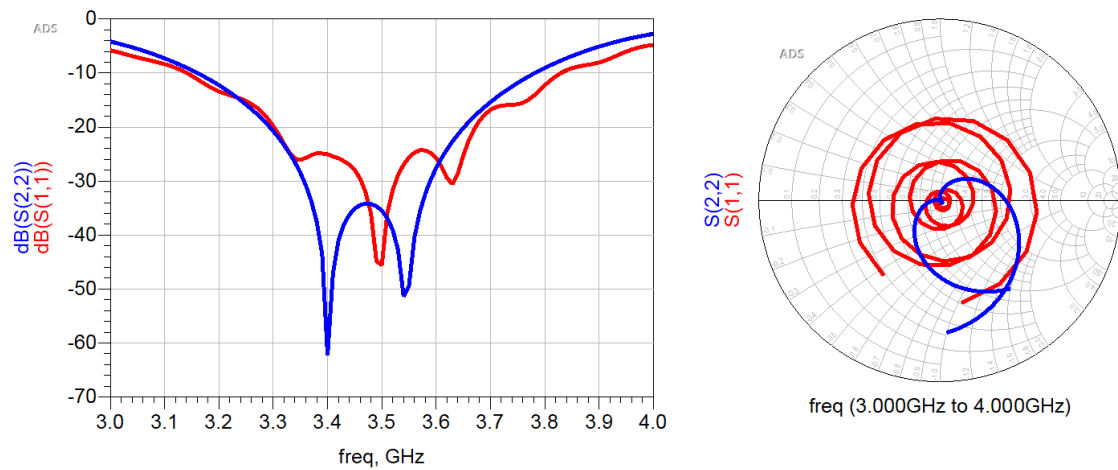


Figura 4.8 Medidas del elemento unitario construido vs elemento unitario sin coaxial

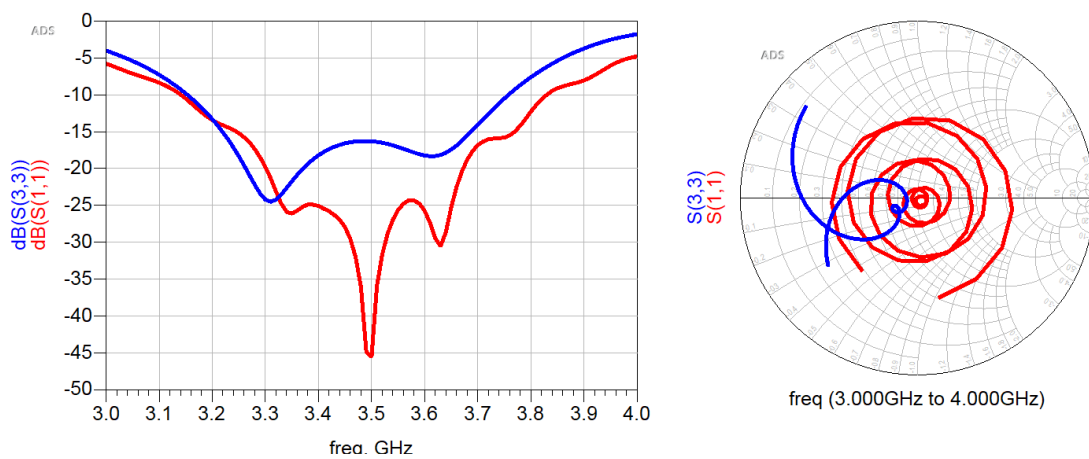


Figura 4.9 Medidas del elemento unitario construido vs elemento unitario con coaxial

Como se puede observar en las figuras anteriores, se obtiene un mayor ancho de banda en el parche construido. La diferencia en ancho de banda entre la simulación sin coaxial y la construcción es de en torno a 0,06GHz en la banda de -10dB y 0,02GHz en la banda de -20dB.

Por último, se procede a medir la antena en la cámara anecoica.

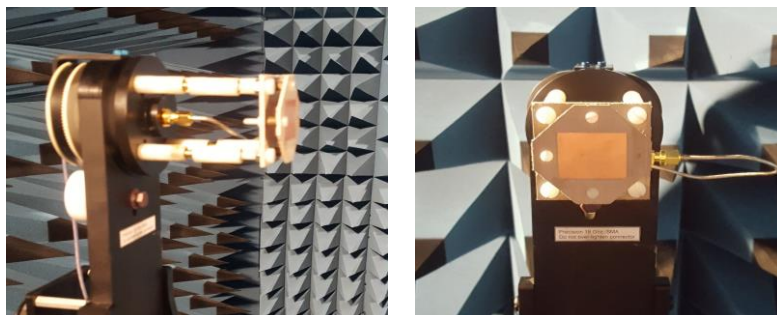


Figura 4.10 Elemento unitario en la cámara anecoica

La ganancia medida en la cámara anecoica es la siguiente:

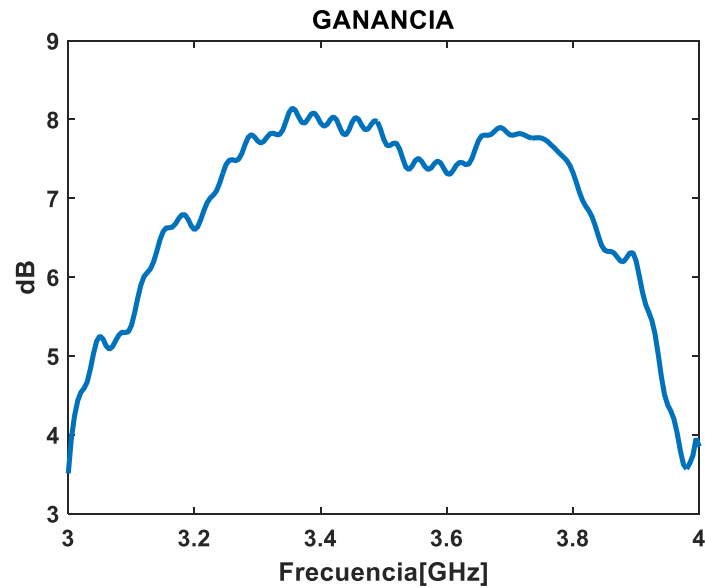


Figura 4.11 Ganancia del elemento unitario construido

La ganancia medida por la cámara anecoica muestra un valor de 7,75dB a 3,5GHz, lo cual supone una diferencia de 0,7dB de diferencia con respecto a la obtenida en CST. Estas pérdidas se deben en gran parte a los cables utilizados en la medición de la cámara.

Las componentes copolar y contrapolar tanto del plano E como del plano H se muestran en las siguientes figuras a diferentes frecuencias:

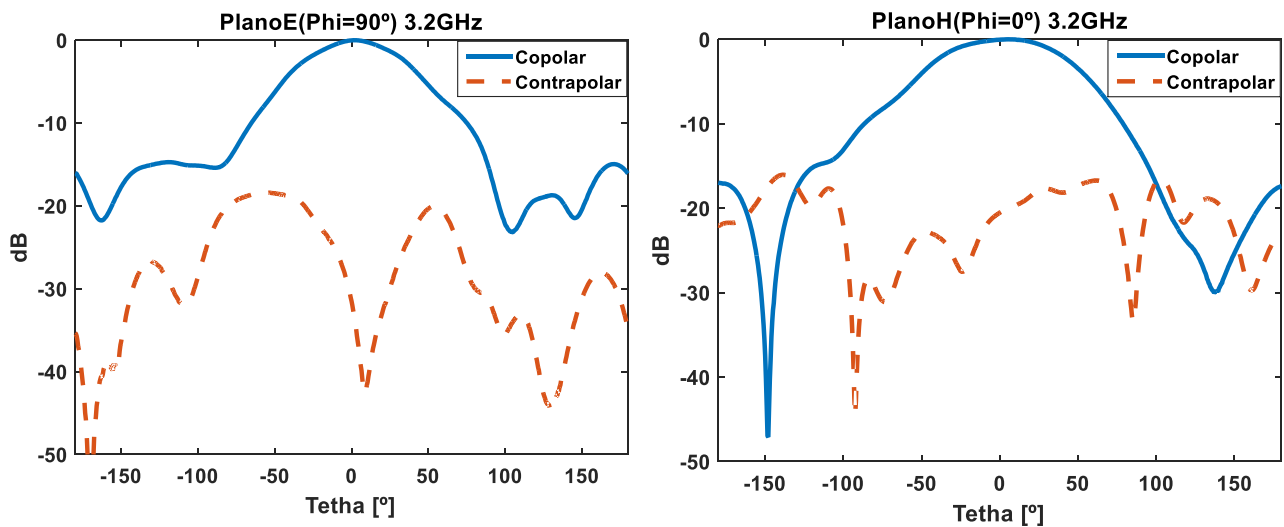


Figura 4.12 Diagrama de radiación normalizado del elemento unitario $f = 3.2\text{GHz}$

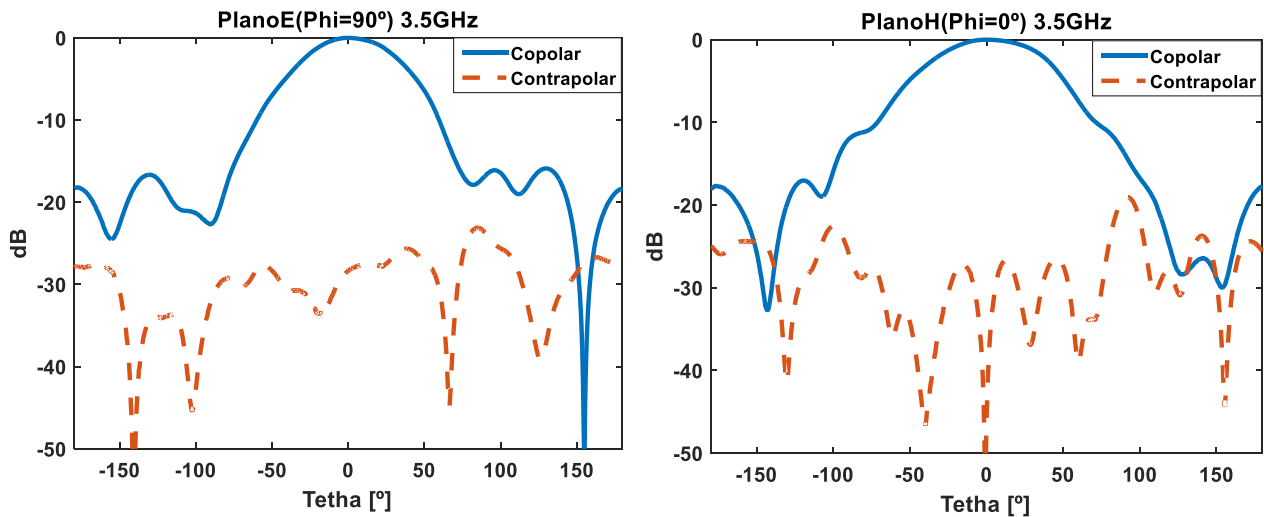


Figura 4.13 Diagrama de radiación normalizado del elemento unitario $f = 3.5\text{GHz}$

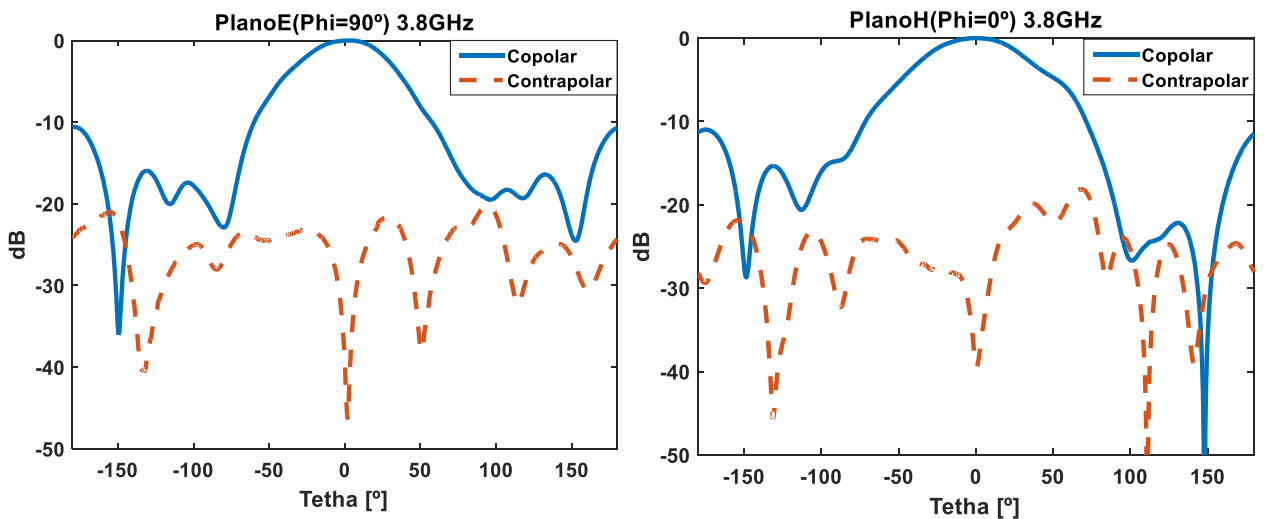


Figura 4.14 Diagrama de radiación normalizado del elemento unitario $f = 3.8\text{GHz}$

Si se analizan las gráficas anteriores, se puede observar como la dirección de apuntamiento está en 0° . La componente contrapolar del diagrama de radiación se encuentra por debajo de -20dB para todas las frecuencias, excepto en el plano H a 3.2GHz que la supera ligeramente.

5 Diseño de la red de alimentación

Para el diseño de la red de alimentación, se sigue un diseño en el que los dos parches de cada extremo se unen en un paralelo con forma de T y finalmente los dos paralelos se unen con la red del parche central y la entrada del generador por una cruz.

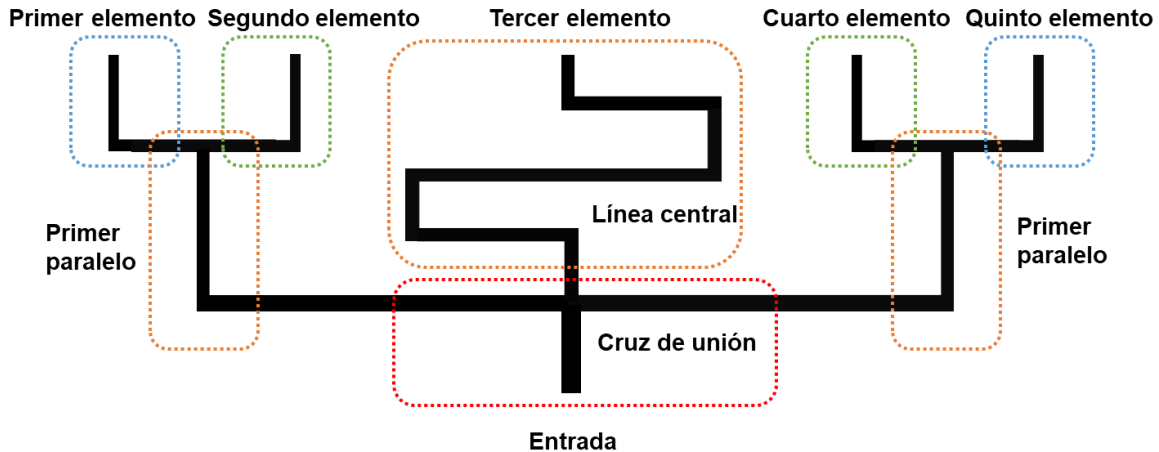


Figura 5.1 Esquema red de alimentación

5.1 Diseño del primer paralelo.

Como se mencionó anteriormente, se escoge una separación entre elementos de 53mm y taper de -2dB. Debido al espesor del sustrato utilizado para la red de alimentación y al ancho mínimo de pista construible, fijado en 0,5 mm, la línea de impedancia característica más alta realizable es de unos 75Ω . Para conseguir el taper deseado, se calcula una distribución de impedancias en el paralelo de 75Ω para el parche del extremo, y de 60Ω para el consecutivo. Se pretende aumentar tanto como sea posible las impedancias a cada entrada del paralelo, dejando líneas mantenedoras de impedancia, para que la impedancia resultante sea lo mayor posible y que la línea resultante del paralelo interfiera lo menos posible en la adaptación de los tramos anteriores.

5.1.1 Primer elemento.

Se desea adaptar la salida de la red a una línea mantenedora de impedancia de 75Ω , para ello se diseña un doble $\lambda/4$ que eleva la impedancia de los 50Ω obtenidos al final de la línea transformadora del remache, a los 75Ω deseados a la entrada del paralelo.

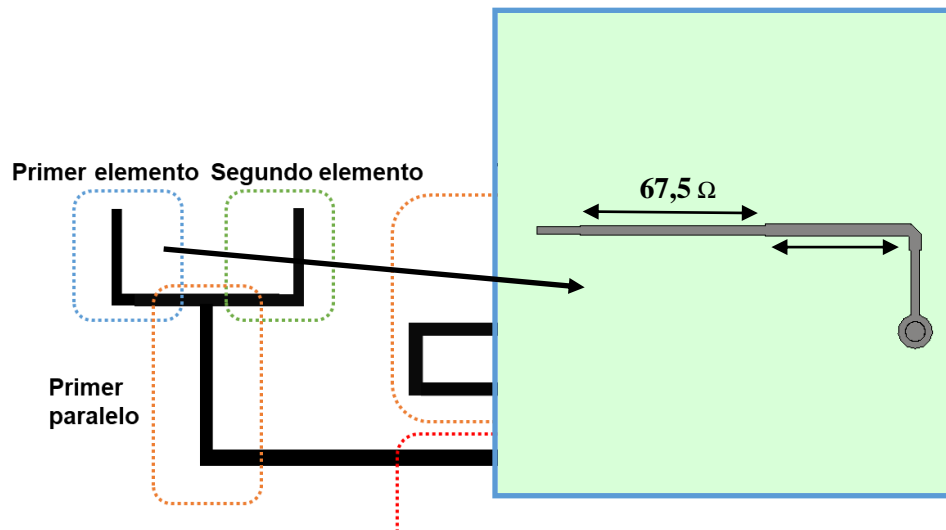


Figura 5.2 Línea de salida del primer elemento

El primer adaptador $\lambda/4$ incluye el codo que direcciona la salida de la red al punto céntrico entre los dos parches. Tiene un ancho de 0,9mm, que equivale una impedancia de $56,5\Omega$, y una longitud total de 11,1 mm sin contar el codo. El segundo $\lambda/4$ tiene un ancho de 0,65mm que equivale a una impedancia de $67,5\Omega$ y una longitud de 13mm. Por último, la línea mantenedora de impedancia de 75Ω , tiene con un ancho de 0,525mm y una longitud de 3mm que sitúan el límite de la línea en el punto intermedio entre las dos salidas.

La adaptación conseguida en esta primera línea es la siguiente:

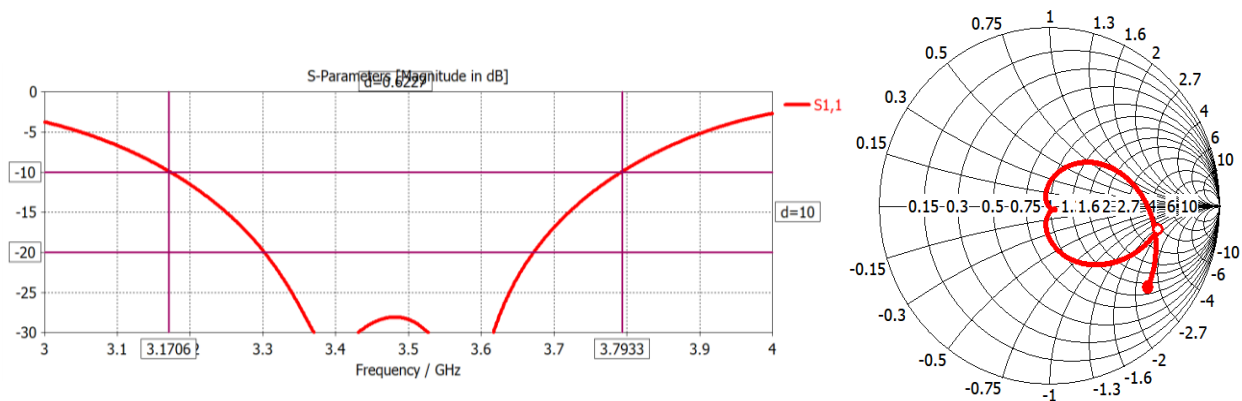


Figura 5.3 Adaptación red de salida del primer elemento

Como se puede observar en la figura 5.3, se mantiene la adaptación y el ancho de banda obtenido con el parche.

5.1.2 Segundo elemento.

En este caso se desea adaptar el parche a una línea mantenedora de impedancia de 60Ω . Para ello se sigue el mismo procedimiento que en el anterior elemento.

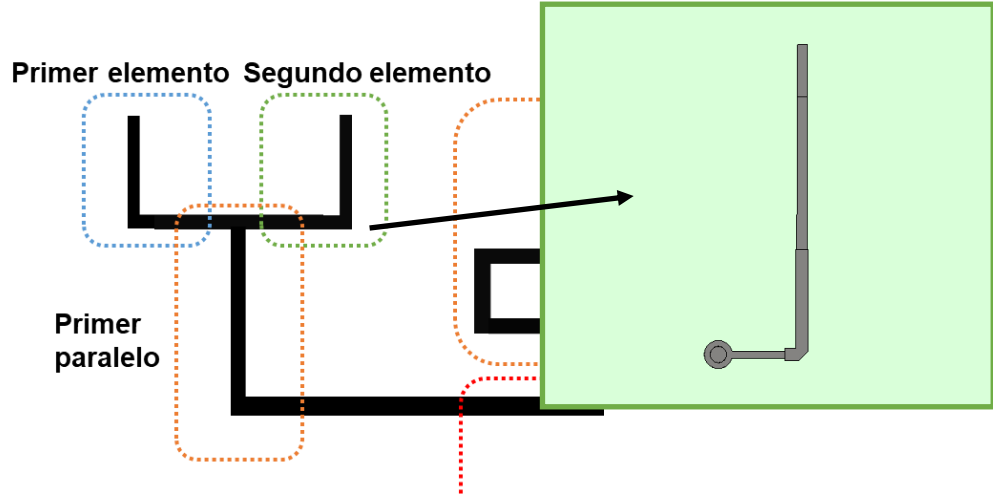


Figura 5.4 Línea de salida del segundo elemento.

El primer adaptador $\lambda/4$ incluye el codo que direcciona la salida de la red al punto céntrico entre los dos parches. Tiene un ancho de 1,05mm que equivale a $51,6\Omega$ y una longitud total de 9,5mm sin contar el codo. El segundo $\lambda/4$ tiene un ancho de 0,87mm que equivale a una impedancia característica de $57,6\Omega$ y una longitud de 13mm. Por último, la línea mantenedora de impedancia de 60Ω , cuenta con un ancho de 0,81mm y una longitud de 4.5mm que sitúan el límite de la línea en el punto intermedio entre las dos salidas.

La adaptación conseguida en esta primera línea es la siguiente:

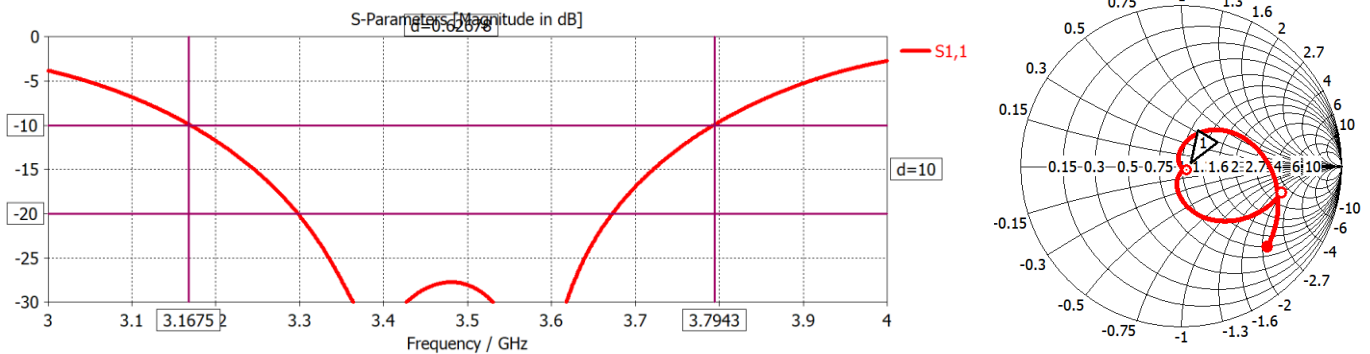


Figura 5.5 Adaptación red de salida del segundo elemento

Como se puede observar en la figura 5.5, se mantiene la adaptación y el ancho de banda obtenido con el parche.

5.1.3 Primer paralelo.

Para la realización del primer paralelo se pretende seguir el mismo procedimiento de un doble $\lambda/4$ que finalice con una línea mantenedora de impedancia. La impedancia de línea escogida es de 75Ω , ya que corresponde con la línea más estrecha construible y por tanto la línea de impedancia característica más alta construible. La elección se toma con el fin de conseguir una impedancia, a la salida de la cruz resultante de la unión de los tres tramos de la red, lo más alta posible. La elección de una impedancia de 75Ω al final de la red que alimenta los dos parches, conlleva una impedancia vista a la salida de la red de alimentación del parche central de 102Ω para poder respetar el taper de amplitud de -2dB .

Para la realización de este diseño se parte de una simulación en ADS en la que se incluyen los archivos s1p exportados de la salida de cada parche como se puede observar en la siguiente figura:

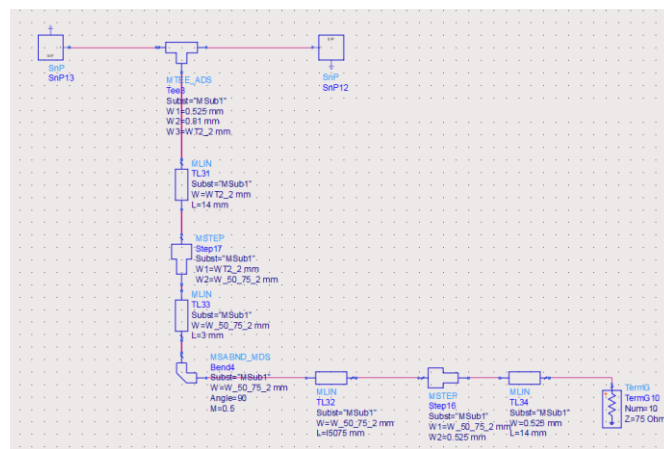


Figura 5.6 Diseño en ADS del primer paralelo.

Al pasar el diseño a CST se comprueba que los resultados que se obtienen difieren mucho de los resultados simulados en ADS. Se intuye que este desajuste puede deberse a los acoplamientos generados por las líneas y los dos parches. Para conseguir una simulación en ADS que tenga en cuenta los acoplamientos, se parte de una simulación en CST en la que se encuentran los dos parches con sus respectivas redes de alimentación hasta milímetros antes del paralelo, con dos puertos que se excitan simultáneamente.

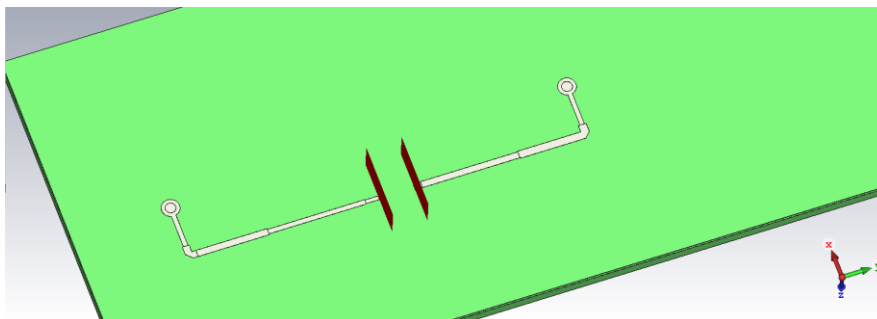


Figura 5.7 Simulación en CST para simular acoplamientos en ADS.

A partir de esta simulación se exporta el archivo s2p que contiene la adaptación de las líneas de la red con los acoplamientos producidos por los parches. En el diseño de ADS se sustituye los dos componentes SnP de una puerta por un componente SnP de dos puertas.

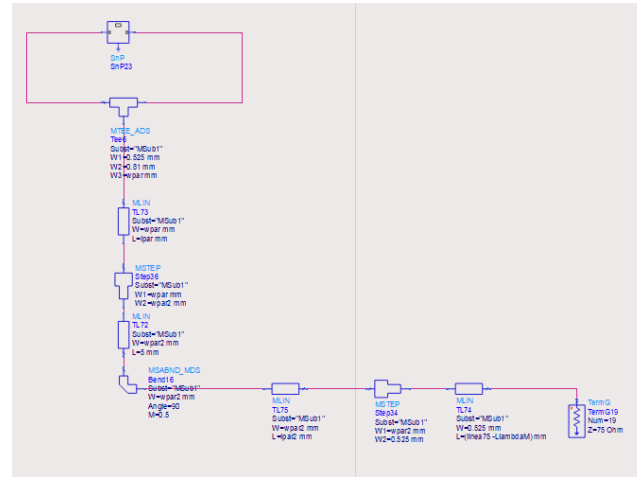


Figura 5.8 Diseño en ADS del primer paralelo con S2P

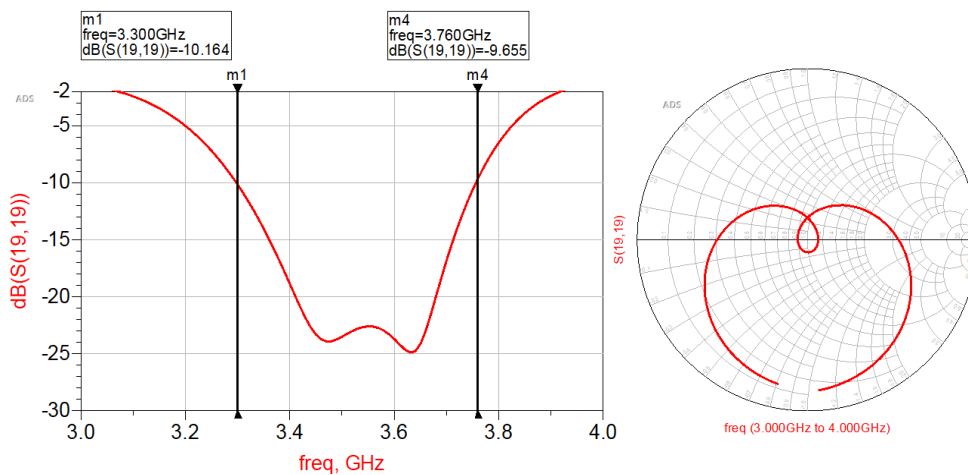


Figura 5.9 Adaptación del primer paralelo en ADS.

La nueva simulación de ADS con el S2P refleja unos resultados muy parecidos a los obtenidos en CST, aunque es necesario retocar un poco el diseño en CST, ya que los acoplamientos que se producen en las nuevas pistas no se tienen en cuenta en ADS. El diseño que se consigue es el siguiente:

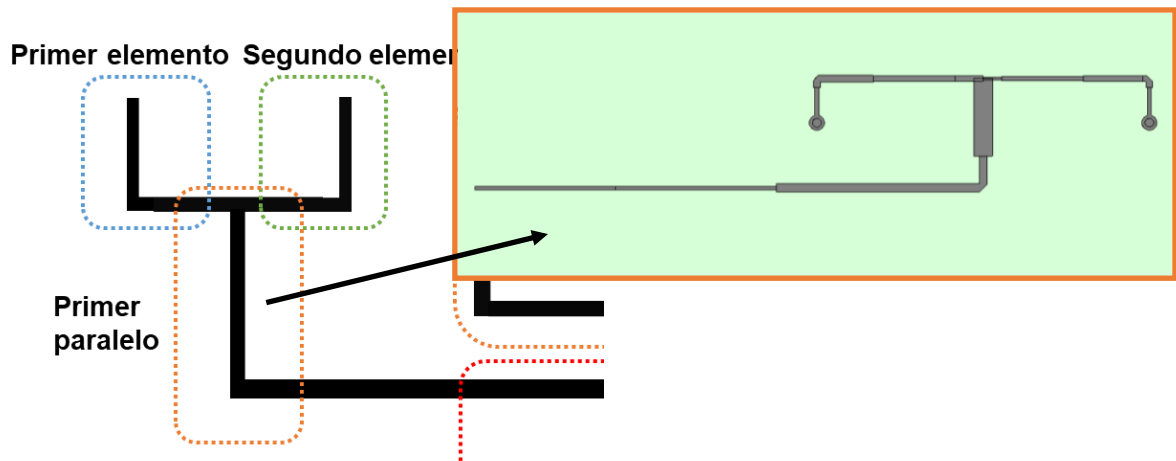


Figura 5.10 Primer paralelo.

El primer adaptador tiene un ancho de 3mm que corresponde con una línea de impedancia característica de 25Ω y una longitud de 12,5mm. El segundo adaptador tiene un ancho de 1.3mm que corresponde con una impedancia característica de $45,1\Omega$ y una longitud de 36,8mm. La longitud del segundo transformador se corresponde con la longitud de un transformador $3\lambda/4$, esto se debe a que se produce una mejora en la respuesta en carta de Smith con respecto a la que se obtiene con un $\lambda/4$, cerrando la respuesta y mejorando la adaptación. La adaptación obtenida en CST es la siguiente

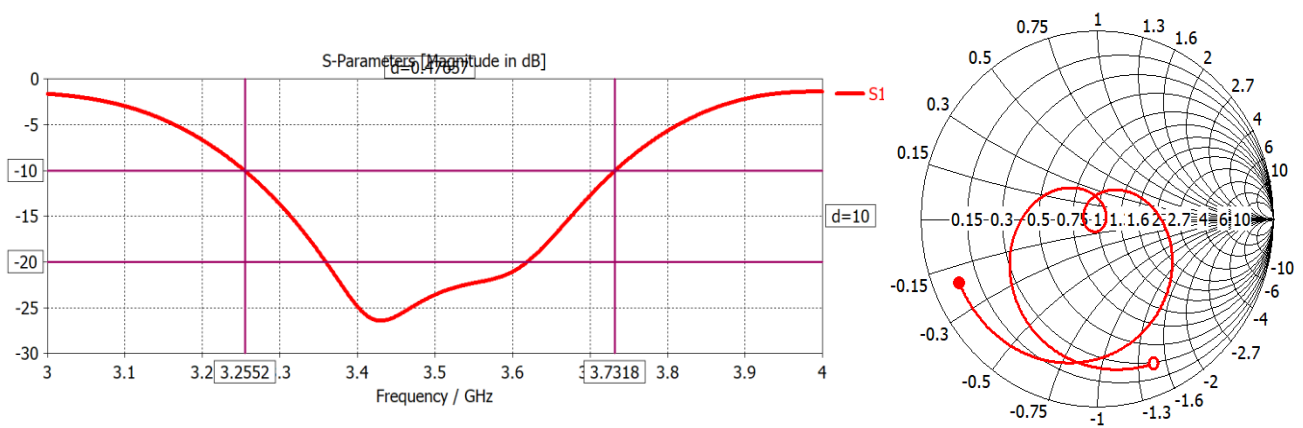


Figura 5.11 Adaptación del primer paralelo.

Se puede observar como aún con la integración del adaptador $3\lambda/4$ la respuesta que se consigue es más abierta que la original del parche. Esto repercute en una peor adaptación y una pérdida de ancho de banda a -10dB cercanas a 0,15GHz.

5.2 Línea adaptadora del parche central.

En el diseño de la línea central de la red de adaptación se tienen dos requisitos. El primero, conseguir una impedancia vista al final de la línea de 102Ω para cumplir con los

requerimientos del taper en amplitud. El segundo, igualar la fase con las obtenidas en los parches anteriores para conseguir que el campo radiado apunte a $\theta=0^\circ$.

Para poder conseguir estos objetivos, al contrario que en las líneas de los parches laterales, primero se va a diseñar una línea mantenedora de impedancia de 50Ω y finalmente un doble adaptador $\lambda/4$ que permita obtener los 102Ω al final de la línea. Junto a todo esto, se tiene que ajustar las dimensiones de las líneas para que el final del conjunto acabe en el punto céntrico entre los dos paralelos laterales. Para facilitar el posterior ajuste de fase se realiza un diseño de doble meandro.

Se comienza la red diseñando los tramos de línea mantenedora de impedancia a 50Ω , que parte desde la línea adaptadora a 50Ω utilizada en todos los elementos, hasta la mitad del segundo meandro.

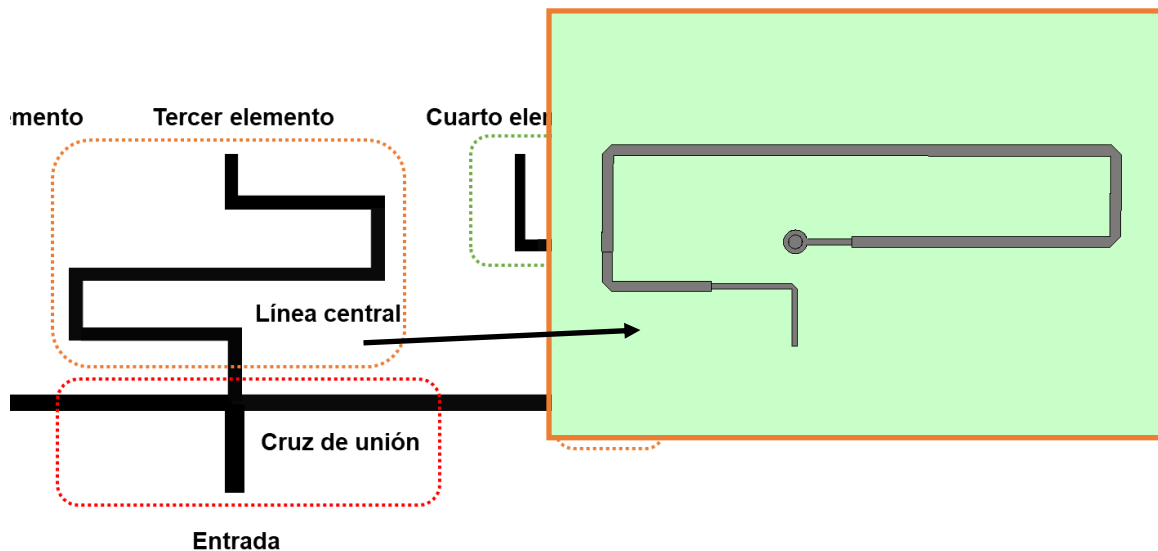


Figura 5.12 Línea Central.

Para la realización del doble adaptador $\lambda/4$ se realiza una primera aproximación en ADS. Para ello se exporta una simulación de la red desde el final de la línea de 50Ω :

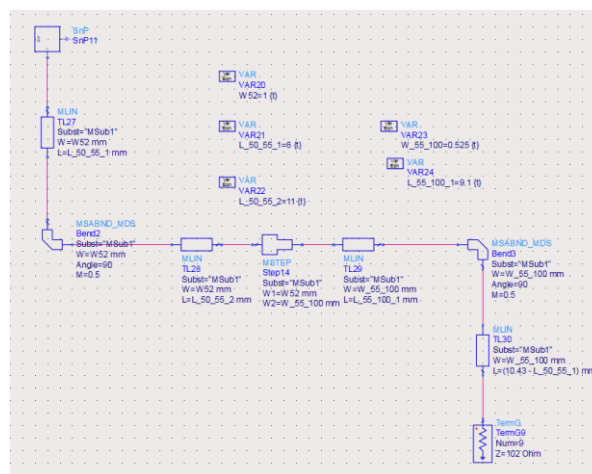


Figura 5.13 Diseño en ADS de la línea central

Los resultados de adaptación en dB y en carta de Smith mostrados en ADS son los siguientes:

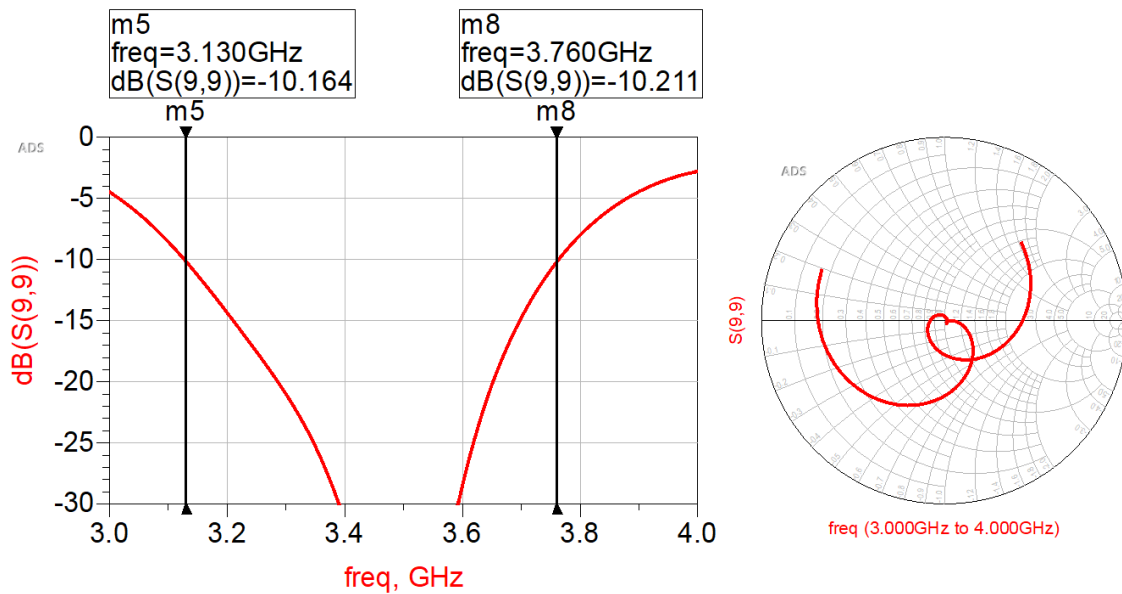


Figura 5.14 Adaptación en ADS de la línea central.

Al trasladar este diseño a CST, la respuesta obtenida varía debido a los acoplamientos producidos entre las pistas, los cuales la herramienta ADS no tiene en cuenta en su simulación.

Tras un pequeño reajuste la adaptación obtenida en CST es la siguiente:

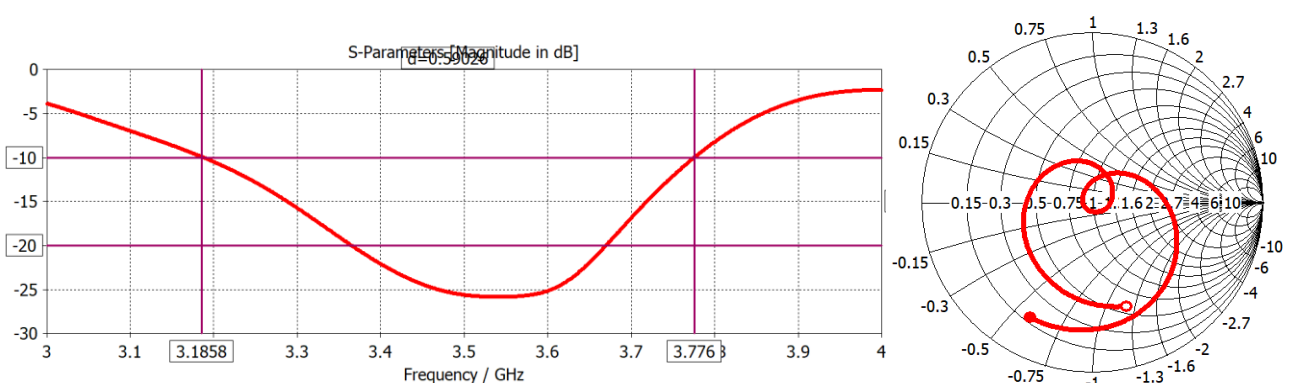


Figura 5.15 Adaptación de la línea central.

Como se puede observar en las dos figuras anteriores, la respuesta obtenida en carta de Smith es más abierta que la del parche original. Esto produce una ligera pérdida de ancho de banda de alrededor de 0,05GHz.

5.3 Ajuste de fase.

Para ajustar la fase entre todos los parches, se ha realizado una nueva simulación en CST, en la que se ha sustituido el parche junto al transformador a 50Ω por una línea de 50Ω de 4mm de longitud con un puerto en el inicio. La función de la línea, además de sustituir al parche, es evitar tener el puerto demasiado cerca del codo para que no se produzcan errores en la medición.

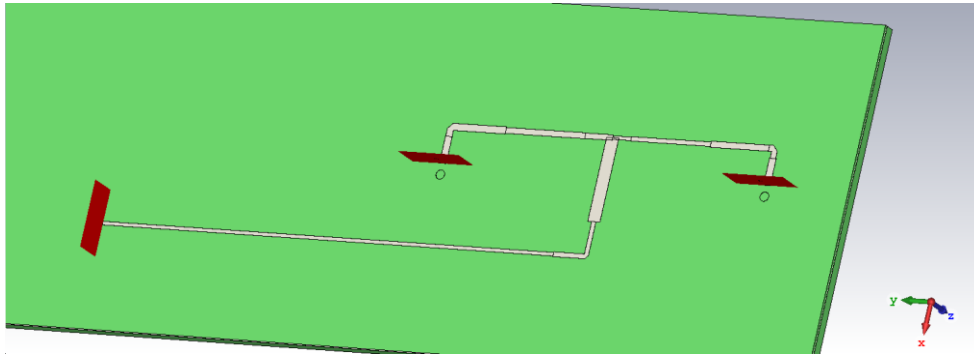


Figura 5.16 Cálculo de fases del primer paralelo

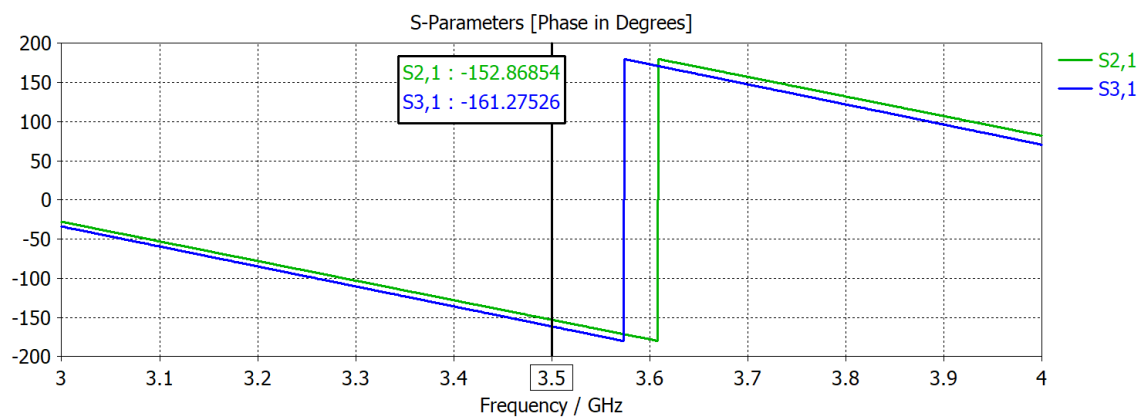


Figura 5.17 Desfase entre el elemento 1 y el elemento 2

Se puede observar un ligero desfase entre los dos parches de unos 9° que puede ser debido a los acoplamientos entre las pistas, ya que ambos elementos recorren el mismo camino.

Para calcular la fase del parche central se sigue el mismo procedimiento. El diseño de doble meandro realizado en la pista del elemento central tiene la finalidad de evitar desajustes en la fase de $n\lambda$ con respecto a los demás elementos, ya que esto produciría un radiación tipo Broadside tan solo a la frecuencia central de la antena, mientras que en las demás frecuencias se produciría un desapuntamiento. El resultado se muestra en las siguientes figuras:

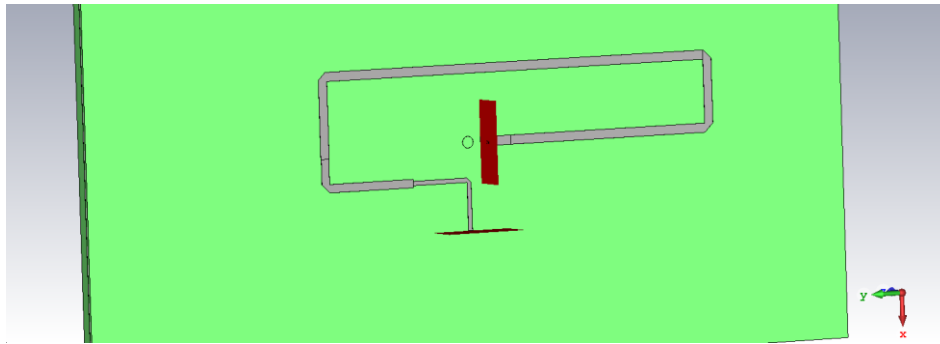


Figura 5.18 Cálculo de la fase de la linea central

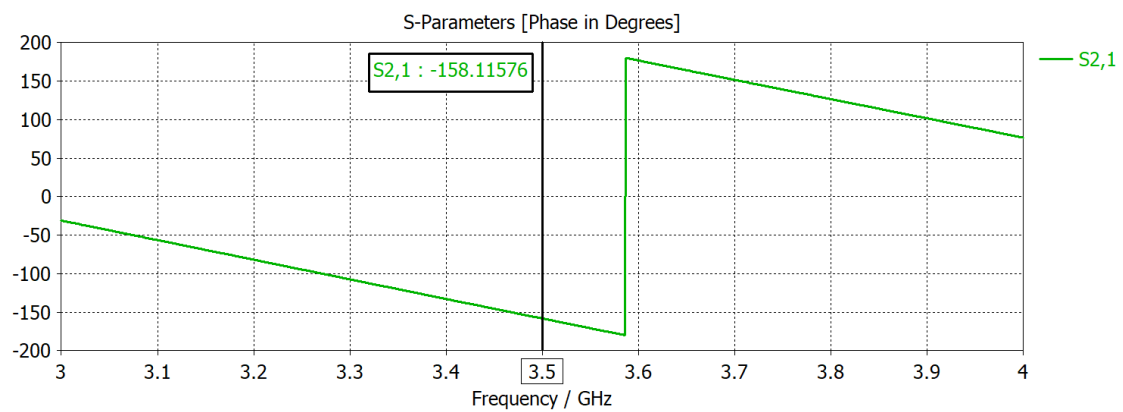


Figura 5.19 Fase de la línea central

La red central se ha ajustado para obtener una fase intermedia con la de los dos parches laterales. En la siguiente figura se pueden observar las fases de los 3 parches en una misma gráfica.

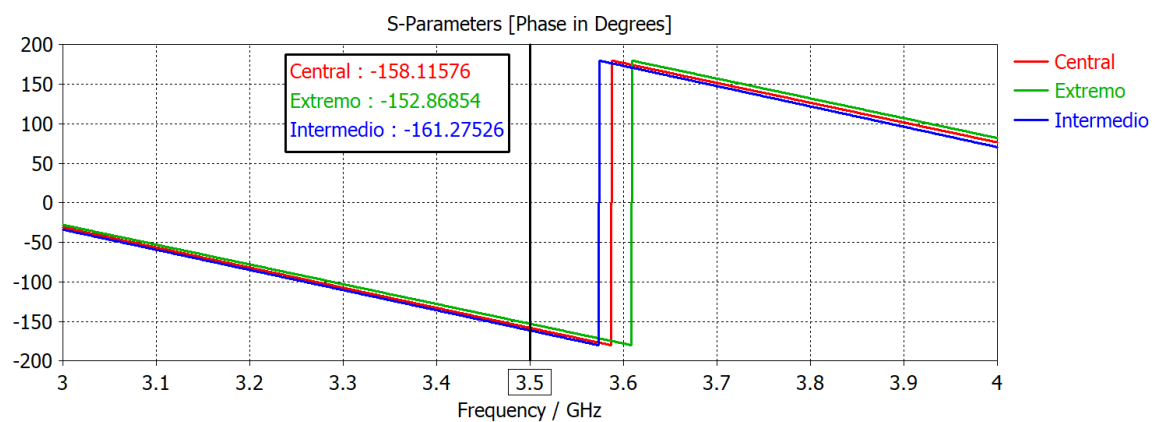


Figura 5.20 Comparación de fases

5.4 Entrada.

Para componer la red completa se realiza un mirror del primer paralelo y se unen las tres líneas resultantes de los dos paralelos y la red central en una cruz, a partir de la cual se diseña la línea de entrada.

La alimentación en la entrada de la red se llevará a cabo por medio de un cable coaxial de 50Ω . Para poder soldar el conector del cable coaxial es necesario dejar un tramo de línea de 50Ω , en este caso se ha dejado un tramo de 7mm.

Para adaptar la cruz de unión a la línea de 50Ω del conector se plantea el diseño de un doble $\lambda/4$ al igual que en los tramos anteriores.

Para tener una primera aproximación se realiza el diseño en ADS de el doble transformador. Se sigue el mismo procedimiento utilizado para diseñar el paralelo anterior. Se realiza en CST una simulación simultánea de 3 puertos, uno en cada extremo de las líneas que llegan a la cruz. Para evitar problemas con los puertos, se recorta parte de la línea mantenedora de impedancia proveniente de los paralelos.

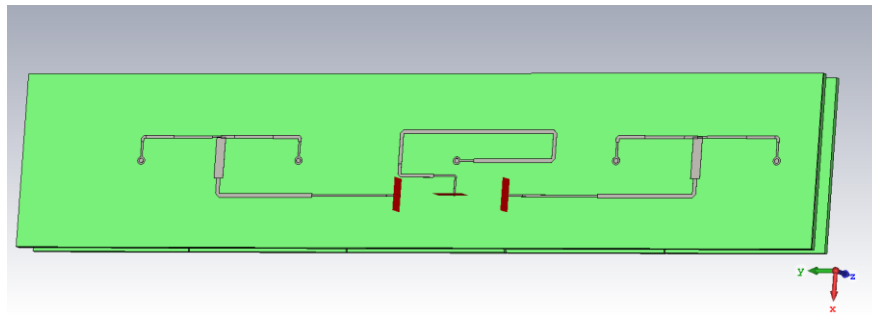


Figura 5.21 Simulación en CST para simular acoplamiento en ADS II

Se extrae el fichero S3P y se implementa el diseño en ADS.

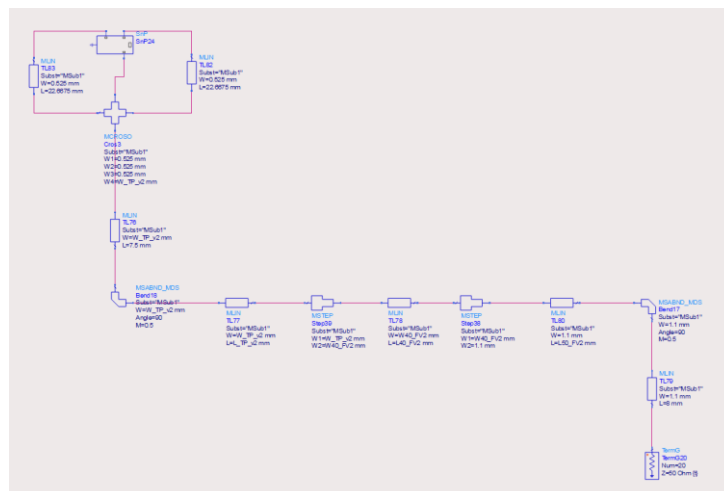


Figura 5.22 Diseño en ADS de la red de alimentación completa

Para conseguir una simulación lo más cercana posible a la que se obtendría en CST, se incluye entre las puertas de las líneas laterales y la cruz, los tramos de línea recortados

en CST para evitar error en la simulación. La adaptación que se consigue en ADS es la siguiente:

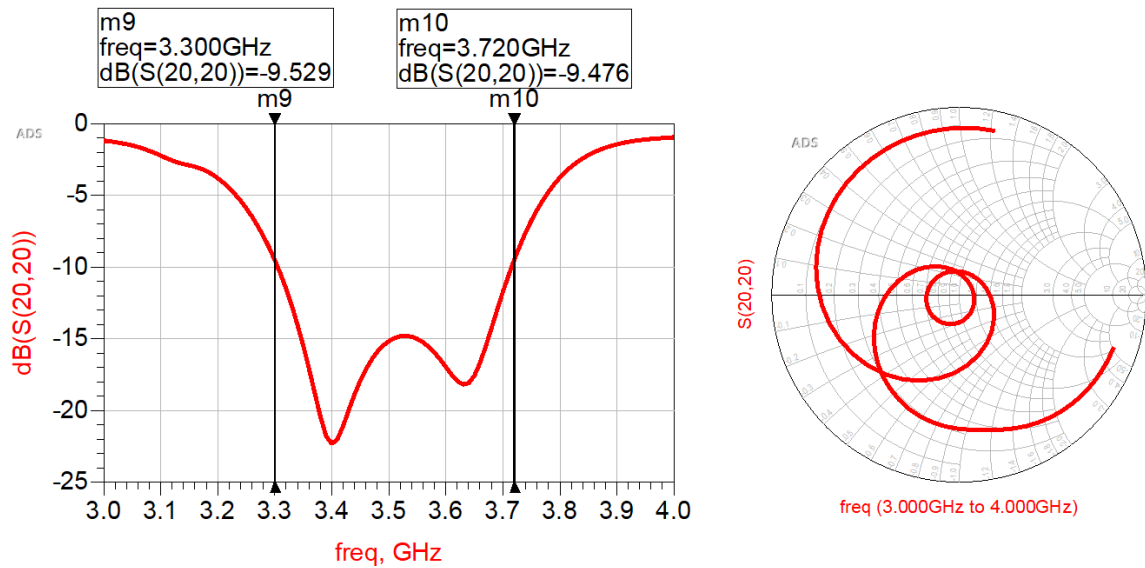


Figura 5.23 Adaptación en ADS de la red de alimentación completa

Se introducen las dimensiones simuladas en ADS a CST y se reajusta la adaptación, ya que no se obtiene exactamente la misma respuesta debido a los acoplamientos entre pistas. El diseño final es el siguiente:

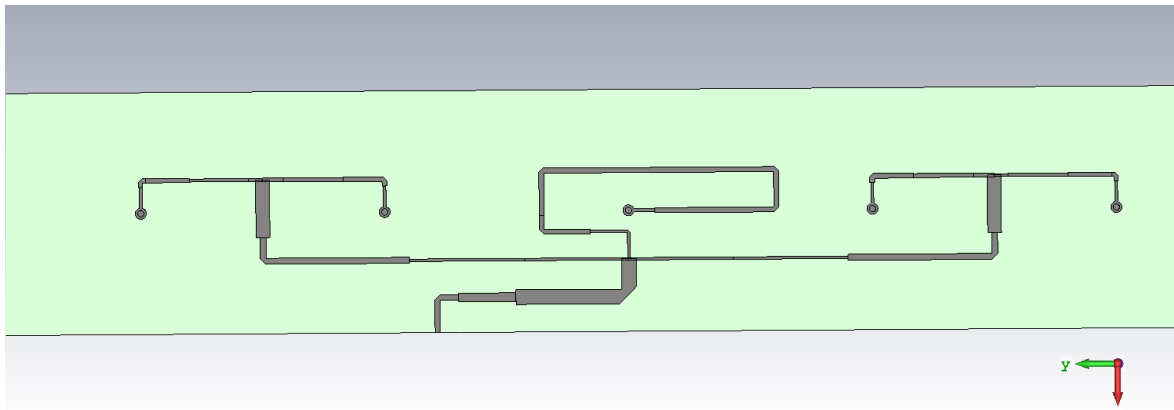


Figura 5.24 Red de alimentación completa

El diseño final se compone de dos adaptadores, el primero de entorno a $3\lambda/4$ con un codo para maximizar el espacio, el segundo de longitud $\lambda/4$, y por último la línea de 50Ω , la cual contiene el segundo codo que vuelve a orientar la línea hacia el límite del sustrato. El primer adaptador tiene un ancho de 3,2mm que corresponde a una impedancia característica de $23,6\Omega$ y una longitud de 28,5mm sin contar el codo. El segundo adaptador tiene un ancho de 1.9mm que corresponde con una línea de 35Ω y una longitud de 12,5mm. Por último, la línea mantenedora de impedancia a 50Ω tiene una longitud de 11mm sin contar el codo.

La adaptación que se obtiene es la siguiente:

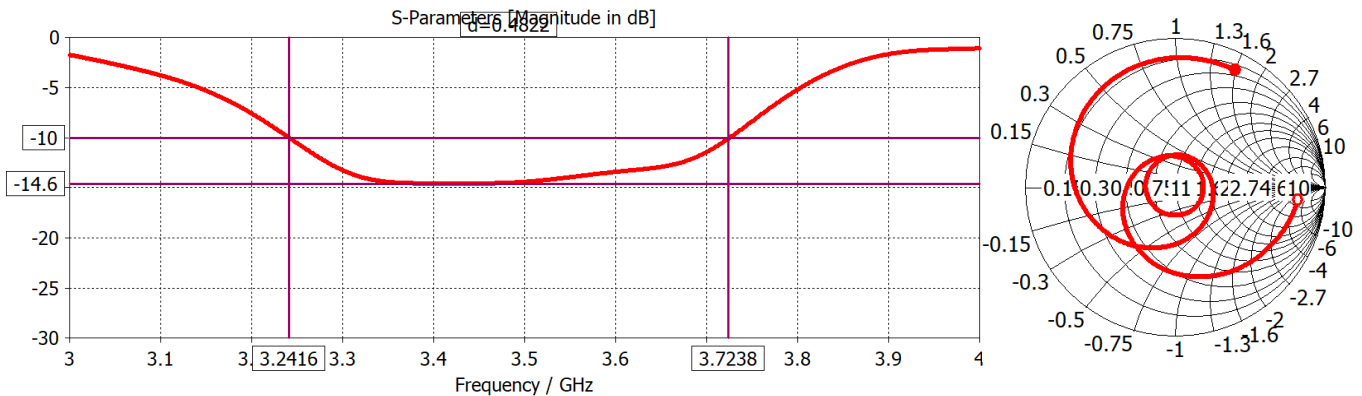


Figura 5.25 Adaptación red de alimentación completa

La adaptación que se obtiene pierde alrededor a 0,15GHz de ancho de banda a -10dB con respecto al parche, pero no se consigue bajar de -15dB. Esto se debe a que la respuesta en carta de Smith es muy abierta con respecto al parche. Se han realizado diferentes pruebas para intentar cerrar la respuesta y así conseguir una mejor adaptación, pero esto lleva como consecuencia la mayor pérdida de ancho de banda a -10dB.

5.5 Construcción y medida del array.

Una vez realizado el diseño tanto del array como de la red de alimentación, se procede a diseñar el cajado para incluir el conector de la sonda coaxial y los taladros correspondientes a los remaches, los tornillos que sostienen los parches apilados, que a su vez sirven para ejercer presión entre los sustratos para evitar espacios de aire entre los planos de masa, y a los tornillos que tienen únicamente esta finalidad.

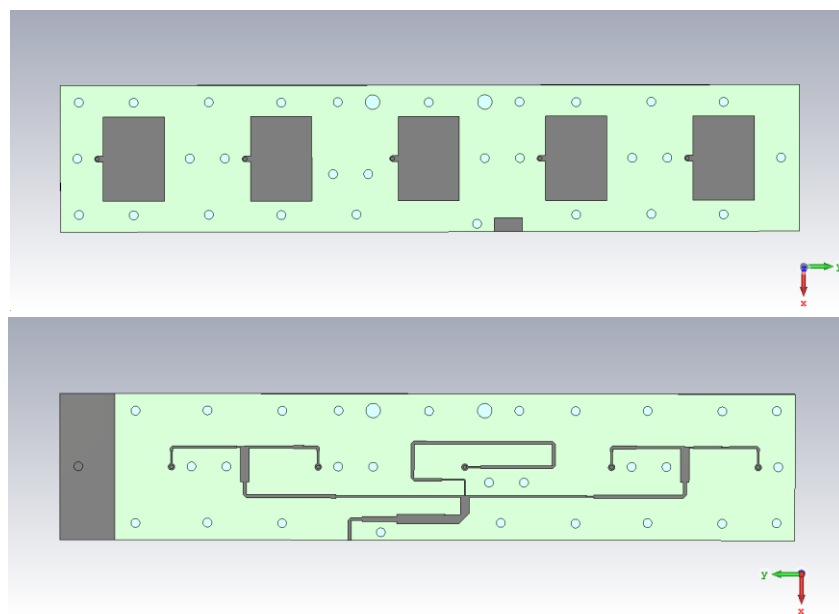


Figura 5.26 Diseño Array y red de alimentación para construir

Se extraen los gerbers correspondientes a cada de capa del array y de la red para su fabricación.

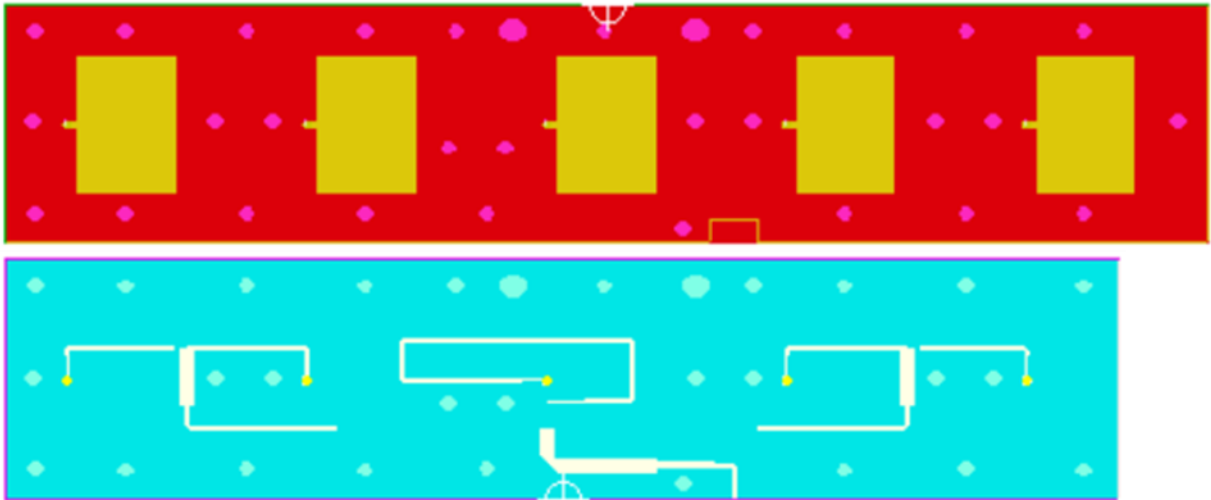


Figura 5.27 Gerbers de la red de alimentación y el array

Los parches apilados se fabrican a partir del gerber mostrado en el apartado 4.3. Una vez construidas todas las partes de la antena, se unen los dos sustratos por medio de tornillos y se sueldan los remaches y el coaxial. El resultado es el siguiente:

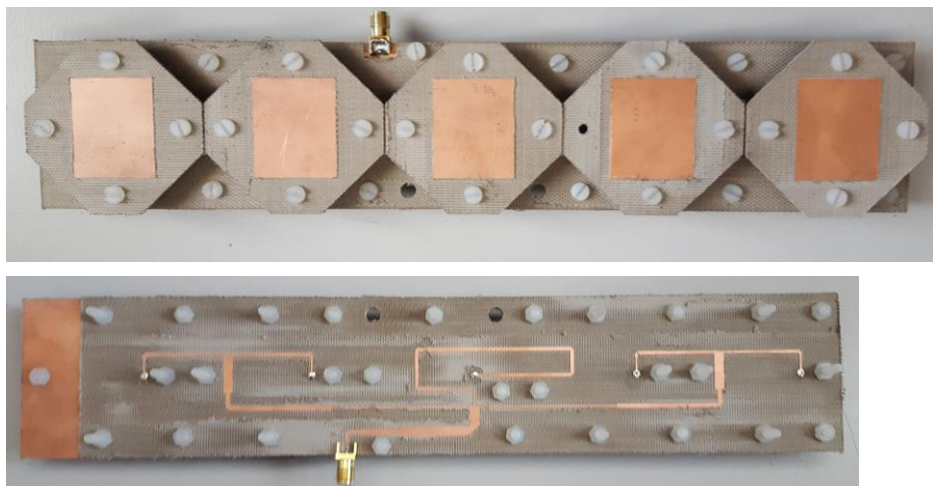


Figura 5.28 Antena completa

El siguiente paso que se lleva a cabo es la medida de la adaptación de la antena en el analizador de espectros.

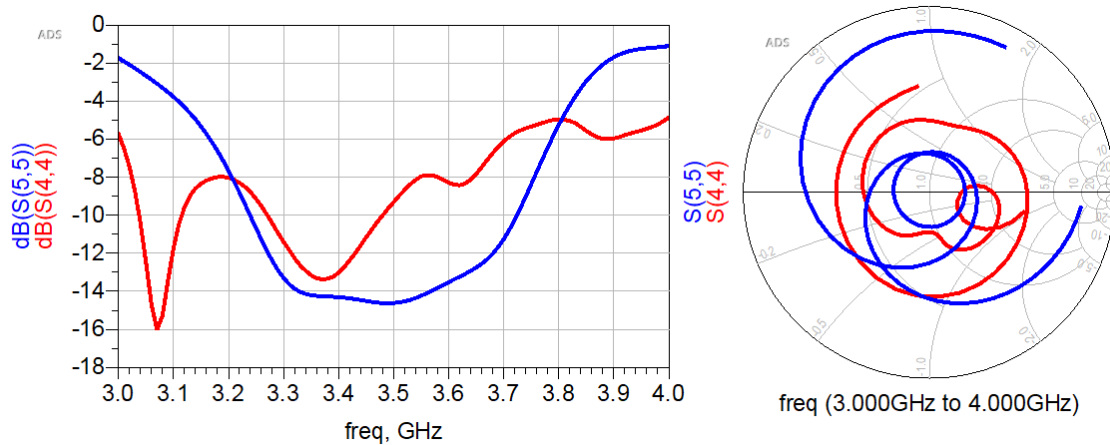


Figura 5.29 Adaptación de la antenna construida(Rojo) vs antenna en CST(Azul)

Como se puede observar en la figura anterior, los resultados están lejos de los esperados. Tanto la respuesta en Carta de Smith como la respuesta en dB del parámetro S11 de la antenna difiere de los resultados obtenidos en CST.

Tras la medición de la adaptación, se dispone a medir la respuesta de la antenna en la cámara anecoica, para comprobar si los resultados obtenidos en adaptación se reflejan en el diagrama de radiación.

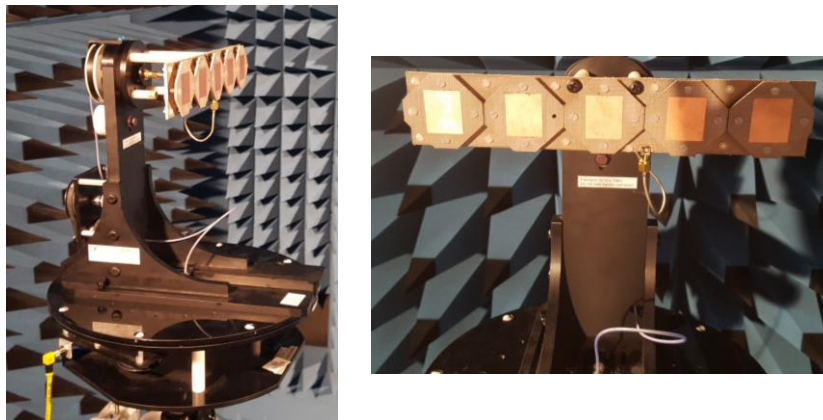


Figura 5.30 Medición de la antenna en la cámara anecoica

La ganancia medida en la cámara anecoica es la siguiente:

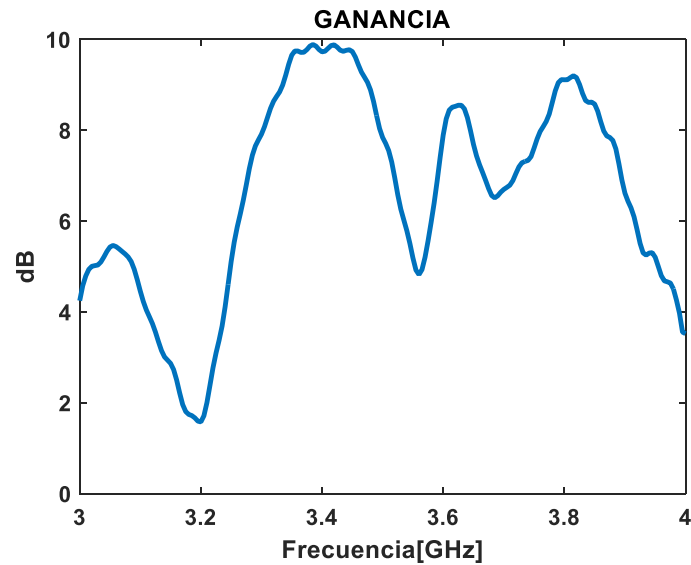


Figura 5.31 Ganancia de la antenna construida

Los resultados obtenidos difieren mucho de la ganancia obtenida en CST de 13,3dB a 3.5GHz, estos resultados llevan a pensar que hay un problema en la construcción de la antenna. A continuación, se muestra el campo radiado en plano E y en plano H a diferentes frecuencias, tanto el simulado en CST como el medido en la cámara anecoica.

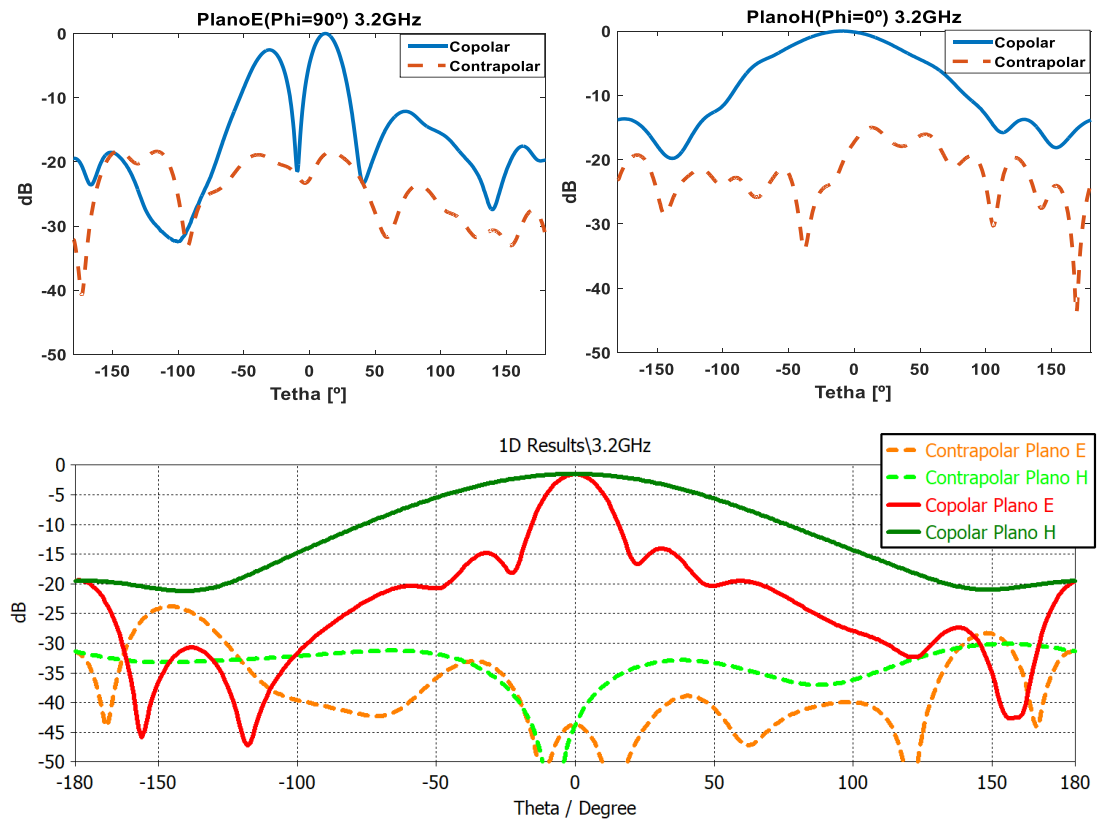


Figura 5.32 Campo radiado por la antenna $f = 3.2\text{GHz}$

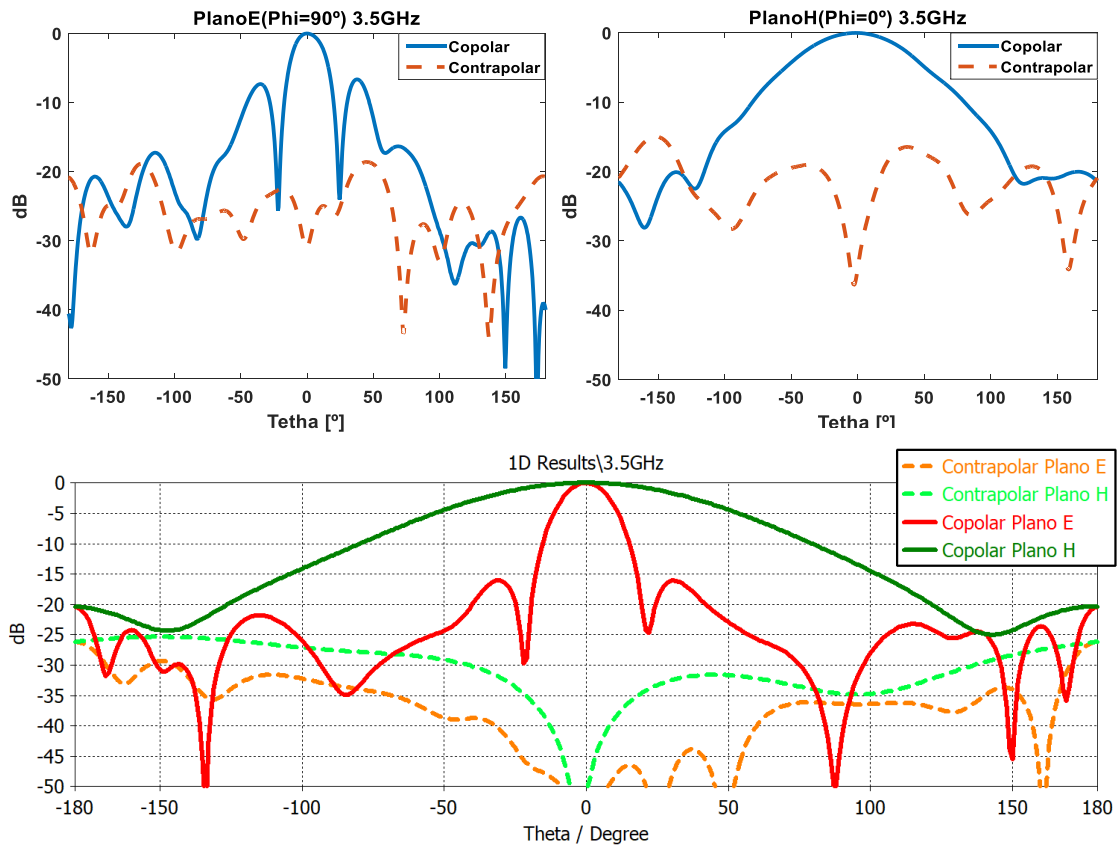


Figura 5.33 Campo radiado por la antenna $f = 3.5\text{GHz}$

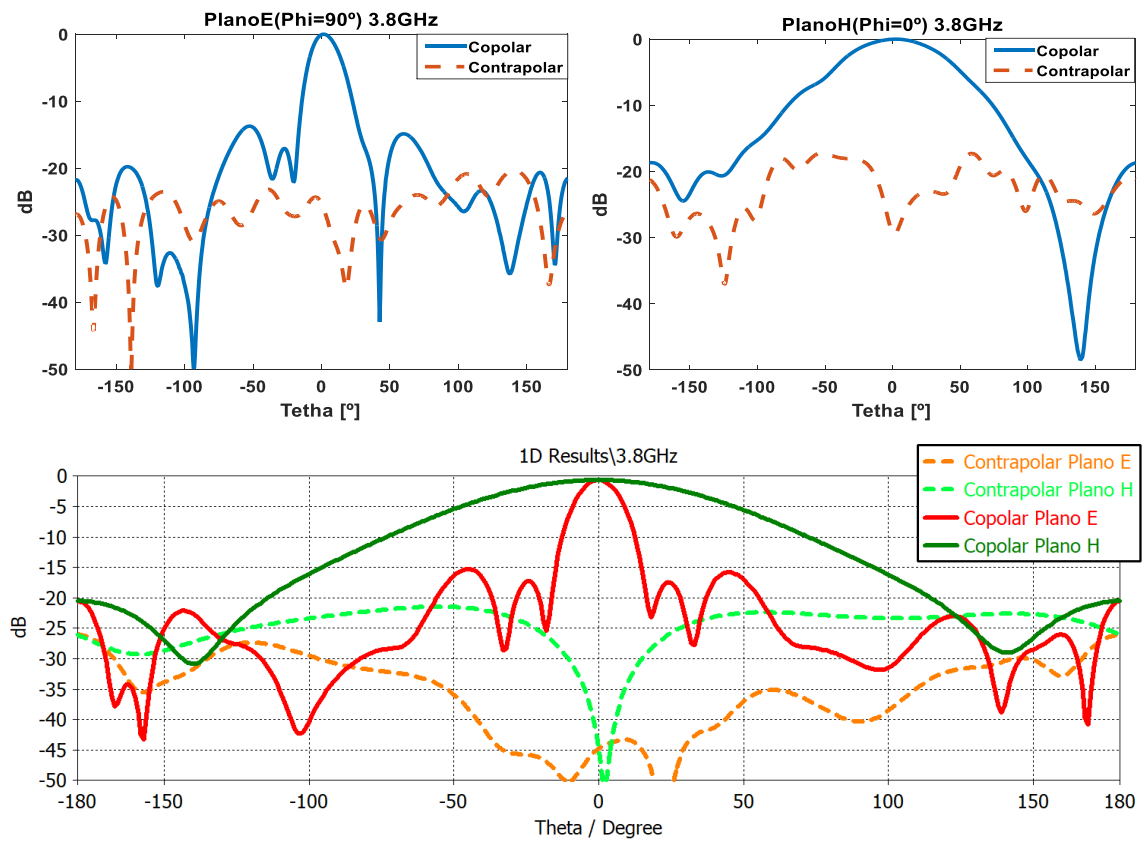


Figura 5.34 Campo radiado por la antenna $f = 3.8\text{GHz}$

Como se puede observar en las figuras anteriores que comparan el campo radiado medido con el campo radiado simulado por CST, los resultados difieren mucho de los esperados. Este hecho puede tener múltiples causantes, el primero podría ser un error de diseño de la red, pero los resultados deberían verse reflejados en la herramienta de simulación CST. Otro factor podría ser un fallo en la construcción de la red, como podría ser un parche mal conectado a la red. Por último, un posible causante de estos resultados podría ser la aparición de líneas biplaca en la unión entre los dos planos de masa. Esto ocurre cuando se forman huecos de aire entre los dos planos de masa, donde la radiación produce un comportamiento similar al de una línea de transmisión. Estas radiaciones pueden acoplarse a la radiación del parche a través de la apertura en el plano de masa para el paso del remache.

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

En este TFG se ha diseñado, construido y medido un array de cinco dobles parches con su correspondiente red de alimentación, para la cual, se ha partido del elemento unitario que compone la antena conformada octogonal de la que parte este proyecto, modificándola para adecuarse a los nuevos requerimientos.

En la construcción y la medida del elemento unitario, se han sondeado dos posibles construcciones en las que se incluye, o no, el plano de masa correspondiente al parche. Se ha construido la versión que mantiene el plano de masa, obteniendo los resultados esperados en ganancia y diagrama de radiación, e incluso mejorando en adaptación a lo simulado previamente.

En cuanto a la construcción de la antena completa, se ha optado por el mismo tipo de construcción realizada en el elemento unitario, pero los resultados no han sido los esperados en ningún caso. Los motivos de estos resultados pueden deberse a un error en el diseño, lo cual se debería reflejar en CST, aunque no se descarta la posibilidad. La otra fuente de error en la construcción puede ser la propia construcción y ensamblado de la antena, que puede tener algún problema en la conexión entre la red de alimentación y los parches, o que la unión entre los dos planos de masa por presión no sea suficiente y se produzcan líneas biplaca entre los planos que se acoplen a la radiación de los parches.

6.2 Trabajo futuro

En primer lugar, habría que realizar un estudio por partes de la red de alimentación ya construida para concretar el motivo de los resultados obtenidos. Se debería construir una nueva antena en la que se eliminara el plano de masa al sustrato que contiene los parches, ya que es el sustrato de mayor espesor y sería en el que menor repercusión tendría la pequeña capa de dieléctrico retirada con el plano de masa, para intentar corregir el comportamiento de la antena.

El siguiente paso a realizar sería la implementación de un array conformado octogonal partiendo del array construido como elemento unitario, similar al que conforma el parche individual original mostrado en la introducción, que conectado a la red de alimentación diseñada en ese proyecto, consiguiera sectorizar la radiación en el plano H de la antena.

Tras la implementación de la nueva antena conformada, el siguiente paso sería abordar el apartado del apuntamiento del lóbulo principal de la antena, modificando la red de alimentación ya implementada para cada array, con el objetivo de implementar desfasadores digitales que programados por medio de un Arduino similar al utilizado en la red principal, permita modificar el apuntamiento en función de las necesidades de cada momento.

Referencias

- [1] **Boletín Oficial del Estado.** “BOE-A-2018-5704”. *Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales.*
- [2] **José Luis Masa Campos.** “Antenas lineales e impresas”. *Antenas y compatibilidad electromagnética. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.*
- [3] **José Luis Masa Campos.** “Agrupación de antenas(Array)””. *Antenas y compatibilidad electromagnética. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.*
- [4] **Jorge A. Ruiz Cruz.** “Tema V. Teoría de circuitos en sistemas de microondas. Parámetros S”. *Medios de Transmisión. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.*
- [5] **Paula Sánchez Dancausa.** “Diseño de antenas de parches conformadas para sistemas de telecomunicaciones de banda ancha”. *Trabajo de fin de grado. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.*
- [6] **Paula Sánchez Dancausa.** “Diseño de Array conformado de Dobles Parches Apilados para Comunicaciones WiMAX y Cobertura Omnidireccional o Sectorial No Simultánea”. *Trabajo de fin de Máster. Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.*

Glosario

TFG	Trabajo de Fin de Grado
RFCAS	grupo RFCAS (Radio-Frecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas)
CST	Computer Simulation Technology
ADS	Advance design Technology

Anexos

A Elementos contruidos

A.1 Piezas del doble parche apilado contruido

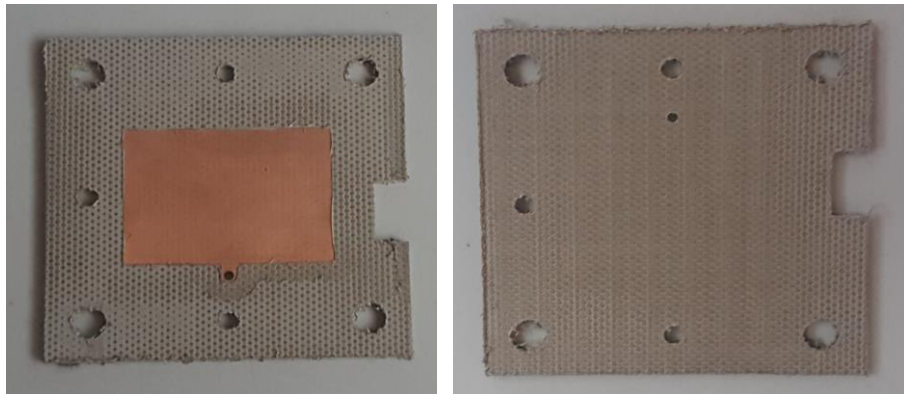


Figura A.0.1 Parche individual contruido

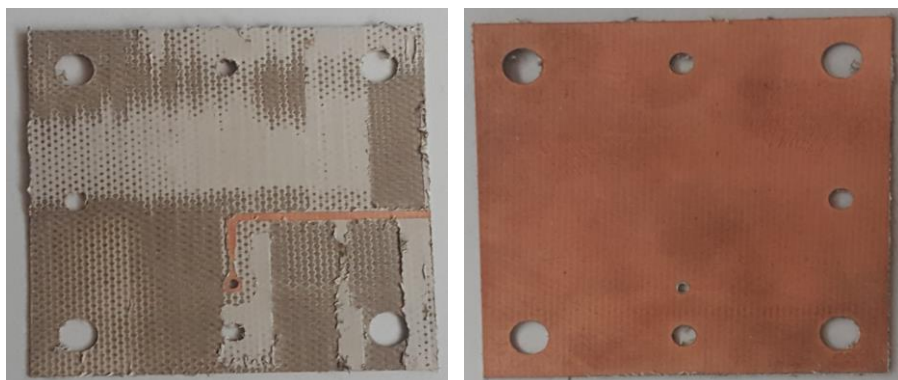


Figura A.0.3 Red del parche individual contruida

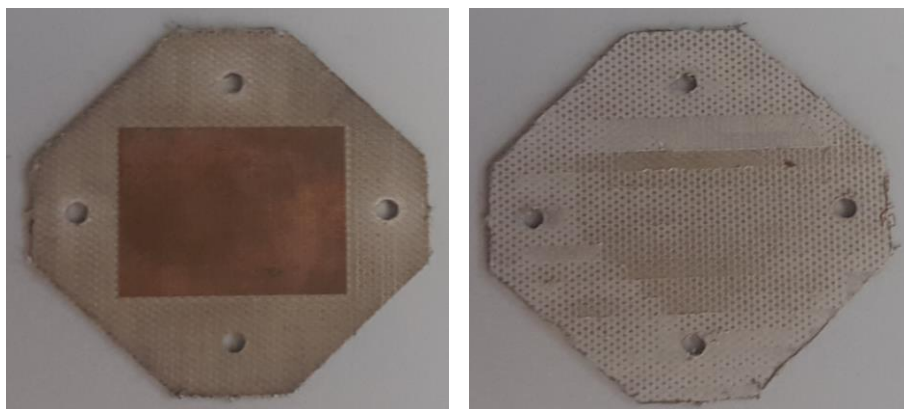


Figura A.0.2 Parche apilado contruido

A.2 Piezas de la red de alimentación y el array construidos

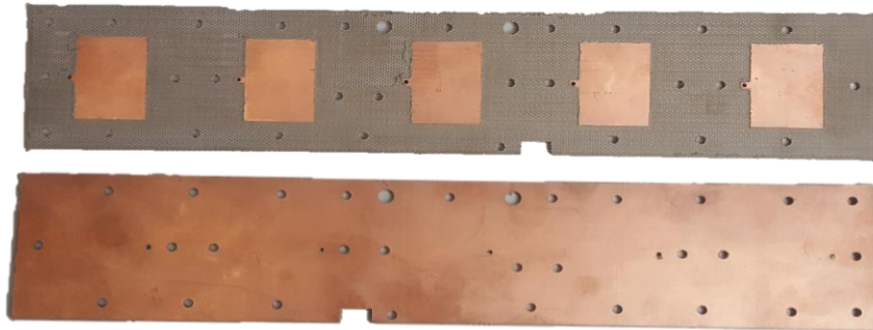


Figura A.0.4 Array de parches construido

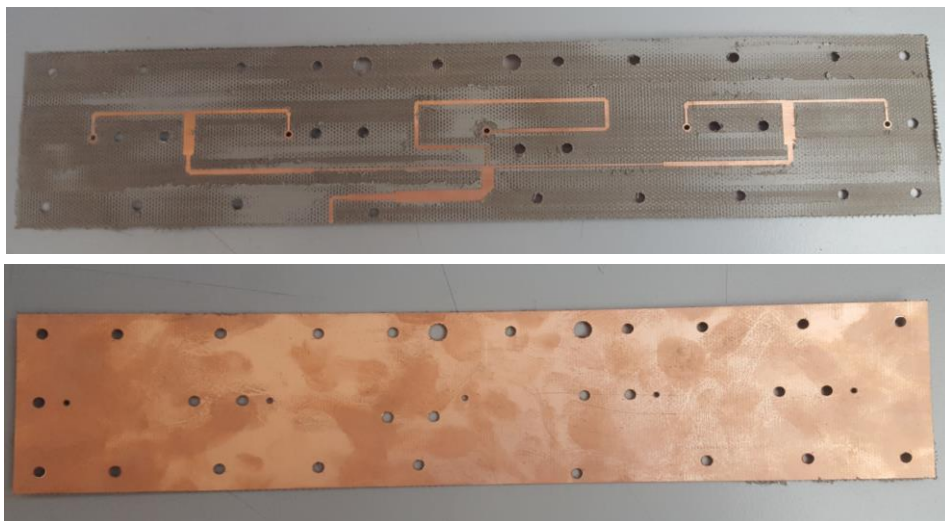


Figura 0.5 Red de alimentación construida